

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Martin Crneković**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Biserka Runje, dipl. ing.

Student:

Martin Crneković

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Biserki Runje

Martin Crneković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARTIN CRNEKOVIĆ**

Mat. br.: 0035179696

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**DIMENZIONALNA KONTROLA PRIGUŠIVAČA VIBRACIJA NA  
VODIČIMA DALEKOVODA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**DIMENSIONAL CONTROL OF VIBRATION DAMPERS ON  
TRANSMISSION LINE CONDUCTORS**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je:

1. Opisati tehnologiju izrade i metode ispitivanja prigušivača vibracija na vodičima dalekovoda.
2. Analizirati utjecaj odstupanja dimenzija prigušivača vibracija na snagu prigušivanja.
3. Sa stajališta dimenzionalne kontrole procijeniti sposobnost procesa izrade prigušivača vibracija.

Zadatak zadan:

11. studenog 2013.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Rok predaje rada:

**1. rok:** 21. veljače 2014.

**2. rok:** 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 3., 4. i 5. ožujka 2014.

**2. rok:** 22., 23. i 24. rujna 2014.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b>	I
<b>POPIS SLIKA</b>	II
<b>POPIS TABLICA</b>	III
<b>POPIS OZNAKA</b>	IV
<b>SAŽETAK</b>	V
<b>SUMMARY</b>	VI
<b>1. UVOD</b>	1
<b>2. STRUJANJEM UZROKOVANE VIBRACIJE</b>	3
2.1. Eolske vibracije	6
2.2. Mehanizam nastanka vibracija	7
2.2.1. Opstrujavanje cilindričnih tijela	7
2.2.2. Nastanak vibracija uslijed otkidanja vrtloga	10
2.2.3. Uglavljivanje frekvencija	12
2.3. Vibracije dalekovoda	13
2.3.1. Eolske vibracije vodiča dalekovoda	13
2.3.2. Galopiranje	14
<b>3. STOCKBRIDGE PRIGUŠIVAČI</b>	16
3.1. Opis prigušivača	17
3.2. Vrste Stockbridge prigušivača	20
3.3. Izrada Stockbridge prigušivača	21
<b>4. ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA STOCKBRIDGE PRIGUŠIVAČA</b>	27
4.1. Provedba ispitivanja	28
4.1.1. Opis ispitivanja	29
4.1.2. Rezultati ispitivanja	30
4.1.3. Tipski atest	32
4.2. Statistička analiza rezultata ispitivanja	33
4.2.1. Kontrolne karte	33
4.2.2. Sposobnost procesa	35
4.2.3. Praćenje procesa X - MR kontrolnom kartom	37
4.2.4. Procjena sposobnosti procesa	41
<b>5. ZAKLJUČAK</b>	45
<b>LITERATURA</b>	46

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Strujnice pri laminarnom opstrujavanju cilindra .....	7
Slika 2.	Nastanak vrtloga pri $Re > 5$ .....	8
Slika 3.	Polje tlaka oko cilindra .....	8
Slika 4.	Von Karmanovi vrtlozi i trag von Karmanovih vrtloga .....	10
Slika 5.	Lom vodiča dalekovoda uslijed zamora .....	16
Slika 6.	Stockbridge-ov originalni crtež prigušivača s betonskim utezima .....	17
Slika 7.	Suvremeni prigušivač kakav se izrađuje u tvrtki Dalekovod .....	18
Slika 8.	Uteg prigušivača .....	18
Slika 9.	Dijelovi prigušivača .....	21
Slika 10.	Kokila za lijevanje tijela hvataljke .....	22
Slika 11.	Uprešavanje matice u tijelo hvataljke .....	23
Slika 12.	Taljenje metala u indukcijskoj peći prije lijevanja .....	24
Slika 13.	Kokila za lijevanje utega .....	25
Slika 14.	Odliveni utezi sa uljevnim sistemom, prije vađenja iz kokile .....	25
Slika 15.	Nacrt prigušivača s označenim izmjerenim dimenzijama .....	28
Slika 16.	Prigušivač na vibratoru LDS V555 .....	29
Slika 17.	Shema uređaja za upravljanje vibratorom i mjerenje signala sa senzora .....	30
Slika 18.	Dijagram snage koju disipira prvi uzorkovani prigušivač u ovisnosti o frekvenciji .....	31
Slika 19.	I-MR (eng. Individual - Moving Range) karta za dimenziju E .....	38
Slika 20.	I-MR karta za dimenziju G .....	38
Slika 21.	I-MR karta za prvu rezonantnu frekvenciju ( $f_1$ ) .....	38
Slika 22.	I-MR karta za minimalnu disipiranu snagu na prvoj rez. frekvenciji ( $P_1$ ) .....	39
Slika 23.	I-MR karta za drugu rezonantnu frekvenciju ( $f_2$ ) .....	39
Slika 24.	I-MR karta za minimalnu disipiranu snagu na drugoj rez. frekvenciji ( $P_2$ ) .....	39
Slika 25.	Procjena sposobnosti za dimenziju E .....	41
Slika 26.	Procjena sposobnosti za dimenziju G .....	41
Slika 27.	Procjena sposobnosti za dimenziju G nakon Johnson transformacije .....	42
Slika 28.	Procjena sposobnosti za prvu rezonantnu frekvenciju ( $f_1$ ) .....	42
Slika 29.	Procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na prvoj rez. frekvenciji ( $P_1$ ) .....	42
Slika 30.	Procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na prvoj rez. frekvenciji ( $P_1$ ) nakon Johnson transformacije .....	43
Slika 31.	Procjena sposobnosti za drugu rezonantnu frekvenciju ( $f_2$ ) .....	43
Slika 32.	Procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na drugoj rez. frekvenciji ( $P_2$ ) .....	43

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Pregled rezultata ispitivanja prigušivača .....	31
Tablica 2.	Tipski atest ispitivanog tipa Stockbridge prigušivača .....	32

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
$Re$		Reynoldsov broj
$Re_{CR}$		Kritični Reynoldsov broj
$v$	m/s	Brzina strujanja fluida
$d$	m	Promjer cilindra (vodiča)
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinematička viskoznost
$Sh$		Strouhalov broj
$f_s$	Hz	Frekvencija otkidanja vrtloga
$C_D$		Koeficijent aerodinamičkog otpora
$C_L$		Koeficijent aerodinamičkog uzgona
$Z$	kg/s	Mehanička impedancija
$F$	N	Sila koja djeluje na stezaljku
$P$	W	Snaga koju disipira prigušivač
$T$	s	Vrijeme trajanja jednog ciklusa
$DKG$		Donja kontrolna granica za kretanje individualne vrijednosti mjerenja
$GKG$		Gornja kontrolna granica za kretanje individualne vrijednosti mjerenja
$\bar{x}$		Aritmetička sredina
$k$		Broj uzoraka
$x_i$		Vrijednost mjerenja
$MR$		Moving range (pokretni raspon)
$\overline{MR}$		Srednja vrijednost pokretnog raspona
$GKG_{MR}$		Gornja kontrolna granica za kretanje MR vrijednosti
$DKG_{MR}$		Donja kontrolna granica za kretanje MR vrijednosti
$T$		Raspon zahtjeva
$USL$		Gornja granica zahtjeva
$LSL$		Donja granica zahtjeva
$\sigma$		Standardna devijacija
$d_2$		Empirijski faktor
$C_p$		Potencijalna sposobnost procesa
$C_{pL}$		Donja potencijalna sposobnost
$C_{pU}$		Gornja potencijalna sposobnost
$C_{pk}$		Demonstrirana izvrsnost



## SAŽETAK

Pošto u današnje vrijeme dalekovodi predstavljaju glavni i najekonomičniji način prijenosa električne energije na velike udaljenosti, potrebno je osigurati njihov pouzdan rad i dugovječnost. Vibracije uzrokovane vjetrom koji nasmužava na vodiče dalekovoda predstavljaju glavni uzrok oštećenja konstrukcijskih elemenata dalekovoda pa se njihov štetni učinak nastoji umanjiti korištenjem prigušivača vibracija. U najraširenijoj upotrebi su Stockbridge prigušivači vibracija, koji se i proučavaju u ovom radu.

Radi boljeg razumijevanja problematike koja se obrađuje u radu, opisana je pojava eolskih vibracija vodiča dalekovoda, koje spadaju u skupinu vibracija uzrokovanih strujanjem fluida oko konstrukcije. Posebna pažnja je posvećena pojavama do kojih može doći prilikom opstrujavanja fluida oko cilindričnih tijela, prvenstveno odvajanju vrtloga na zavjetrinskoj strani tijela, koje dovode do pojave vibracija karakterističnih za vodiče dalekovoda.

Zatim je detaljno opisan Stockbridge prigušivač, s tim da je posebna pažnja posvećena parametrima koji utječu na karakteristike prigušivača, masi utega, geometriji utega i duljini užeta. Uz to je detaljno opisan proces proizvodnje svih dijelova ovog tipa prigušivača kako bi se kasnije lakše moglo ustanoviti koje je dijelove procesa potrebno kontrolirati i unaprijediti.

Nadalje, provedeno je ispitivanje uzoraka prigušivača s ciljem prikupljanja podataka o karakteristikama ispitivanih prigušivača. Rezultati ispitivanja, zajedno sa rezultatima tipskog atesta, koriste se u statističkoj analizi. Statistička analiza je provedena praćenjem procesa korištenjem MR (eng. moving range) kontrolne karte. Na ovaj način se određuje da li je proces „pod kontrolom“, što je temeljni uvjet za procjenu sposobnosti procesa. Procjenom sposobnosti procesa, vidljivo je može li proces proizvoditi jedinice unutar granica specifikacije. Upravo to je i cilj ovog rada jer, procjenom sposobnosti, može se utvrditi potreba za kontrolom i poboljšanjem određenih procesa tijekom izrade prigušivača te se, u konačnici, na taj način mogu dobiti ujednačenije vrijednosti karakteristika prigušivača i smanjiti troškovi izrade.

Ključne riječi: dalekovod; strujanjem uzrokovane vibracije; Stockbridge prigušivač vibracija; izrada prigušivača; statistička analiza; sposobnost procesa.

## SUMMARY

Since overhead transmission lines are the main and most cost-effective way of transmitting electrical energy over great distances, it is necessary to ensure their reliability and longevity. Vortex-induced vibrations, caused by wind, represent the main cause of damage to structural elements of overhead transmission lines. Their effect is reduced by the use of vibration dampers. The most commonly used and widespread is Stockbridge vibration damper, which is studied in this paper.

In order to better understand vortex-induced vibrations, eolian vibrations are described in detail, along with flow around circular cylinders, such as transmission lines. Special attention was paid to vortex development and vortex separation that cause the characteristic vibrations of the transmission line conductors.

Stockbridge damper is also described in detail, with special attention to the parameters that affect the characteristics of the damper, weight, geometry and length of the messenger cable. In addition, a detailed description of the manufacturing process of all parts of the damper is given, in order to determine which parts of the process need to be controlled and improved.

Furthermore, sample testing of dampers is carried out in order to collect data on the characteristics of the tested dampers. The test results, together with the results of type tests, are used for statistical analysis. Statistical analysis was performed using MR (moving range) control charts which enable us to determine whether the process is „under control“, which is a fundamental requirement for assessing process capability. By assessing process capability, it can be seen whether the process can produce units within the specification limits. This way we can determine the need for control and improvement of certain parts of the manufacturing process, in order to get more uniform values of damper characteristics and reduce production costs.

**Key words:** overhead transmission lines; vortex-induced vibration; Stockbridge vibration damper; damper production; statistical analysis; process capability.

## 1. UVOD

U današnje vrijeme, život bez električne energije je nezamisliv. Iz tog razloga je tehnika prijenosa električne energije od vitalne važnosti, kako za stanovništvo, tako i za gospodarstvo. Pošto su dalekovodi glavno i najekonomičnije sredstvo prijenosa električne energije na velike udaljenosti, potrebno je osigurati njihovu dugovječnost i pouzdanost. Dalekovodi su svakodnevno izloženi utjecaju različitih vremenskih uvjeta, među koje spada i vjetar. Vjetar, strujanjem oko vodiča dalekovoda, izaziva vibracije vodiča, koje s vremenom mogu oštetiti konstrukcijske elemente dalekovoda i skratiti njegov životni vijek. Da bi se to spriječilo, na dalekovodima se najčešće koriste Stockbridge prigušivači vibracija, koji se u ovom radu i proučavaju.

Pošto je prvo poglavlje uvod, u drugom poglavlju je općenito obrađena tematika strujanjem uzrokovanih vibracija. Opisani su različiti mehanizmi nastanka vibracija, a detaljnije je opisan mehanizam nastanka eolskih vibracija i opstrujavanje cilindričnih tijela, koje se javlja kod vodiča dalekovoda. Posebna pažnja je posvećena pojavama do kojih može doći prilikom opstrujavanja fluida oko cilindričnih tijela, a koje dovode do pojave vibracija karakterističnih za vodiče dalekovoda. Prvo poglavlje predstavlja uvod u problematiku vibracija dalekovoda i omogućava razumijevanje nastanka vibracija uzrokovanih strujanjem.

U trećem poglavlju je detaljno opisan Stockbridge prigušivač, od svog nastanka do danas. Posebna pažnja je posvećena parametrima koji utječu na karakteristike prigušivača, kao i vrsti prigušivača koja je danas u najširoj uporabi. Uz to, detaljno je opisan proces proizvodnje i materijali od kojih su izrađeni pojedini dijelovi Stockbridge prigušivača, kakvi se proizvode u Dalekovodovom proizvodnom pogonu.

U četvrtom poglavlju je provedeno ispitivanje karakteristika uzorkovanih prigušivača te je zatim provedena statistička analiza dobivenih rezultata. Najprije je detaljno opisan način ispitivanja prigušivača, a potom su prikazani rezultati ispitivanja. Uz to, prikazan je i tipski atest za ispitivani tip prigušivača, iz kojeg je vidljivo jesu li rezultati ispitivanja u skladu sa standardima za zadani tip prigušivača. Sva ispitivanja su provedena u Dalekovodovom laboratoriju, korištenjem uobičajenih i standardiziranih metoda i opreme za ispitivanje. Nakon toga je provedena statistička analiza, najprije praćenjem procesa korištenjem odgovarajuće kontrolne karte, a potom i procjenom sposobnosti procesa proizvodnje prigušivača.

Zaključak je dan kao peto poglavlje i u njemu su prikazani zaključci izvedeni iz statističke analize provedene u prethodnom poglavlju, kao i osvrt na cjelokupan rad.

Cilj ovog rada je procjena sposobnosti procesa izrade prigušivača, s ciljem eventualnog poboljšanja procesa izrade, kako bi se smanjila potreba za naknadnom obradom gotovih proizvoda, a time i troškovi izrade.

Ovom prilikom, posebne zahvale upućujem mentoru, prof. dr. sc. Biserki Runje, na ukazanoj velikoj pomoći, podršci i strpljenju prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem i tvrtki Dalekovod na omogućenom uvidu u proces proizvodnje i ispitivanja prigušivača. Zahvale upućujem i prof. dr. sc. Hinku Wolfu na pruženoj pomoći oko izbora literature vezane za opstrujavanje tijela i vibracije.

## 2. STRUJANJEM UZROKOVANE VIBRACIJE

Pojava vibracija uzrokovanih strujanjem se danas intenzivno proučava te se ovom problematikom bave mnoge inženjerske grane, svaka sa svojom terminologijom i specifičnim metodama. Razlog tome je što su strujanjem uzrokovane vibracije česta pojava u strojarstvu i građevini, kao na primjer kod mostova, dimnjaka, dalekovoda, naftnih platformi, krila aviona, motora, izmjenjivača topline itd. Važnost koja se pridaje vibracijama i utjecaju strujanja fluida je posebno porasla nakon rušenja mosta na Tacoma Narrowsu 1940. godine, koji se često uzima kao primjer djelovanja rezonancije, iako je stvarni uzrok rušenja bilo aero-elastično treptanje (eng. aeroelastic flutter).

Kod strujanjem uzrokovanih vibracija, problem ne leži u konstrukciji i njezinom odzivu, osim ako sustav nije izrazito nelinearan, nego je problem vezan uz način uzbude sustava. Izvora uzbude ima mnogo i teško ih je identificirati, no ipak se mogu klasificirati u tri skupine:

- uzbuda izazvana vanjskim utjecajima (eng. Extraneously induced excitation - EIE),
- uzbuda izazvana nestabilnošću (eng. Instability-induced excitation - IIE),
- uzbuda izazvana gibanjem (eng. Movement-induced excitation - MIE).

Uzbuda izazvana vanjskim utjecajima je uzrokovana fluktuacijama u brzini ili tlaku strujanja i ne ovisi o nestabilnostima strujanja koja su uzrokovana opstrujavanjem konstrukcije, tj. kod ovog načina uzbude, energija uzbude dolazi iz vanjskog izvora. Primjer ovakve uzbude je tijelo koje vibrira uslijed turbulencija u struji fluida koja nailazi na tijelo, vibracije uslijed kavitacije ili nekih aspekata dvofaznog strujanja, uslijed oscilirajućeg strujanja uključujući i valove, uslijed potresa i sličnih pojava.

Kod uzbude izazvane nestabilnošću, izvor uzbude je u nestabilnosti strujanja koja je rezultat opstrujavanja konstrukcije. Fluktuacije u strujanju se javljaju kada brzina strujanja prijeđe određeni iznos. Osnovni uzroci nestabilnosti su:

- otkidanje vrtloga,
- narušeni smični slojevi,
- nestabilnost područja kontakta,

- nestabilnost bistabilnog strujanja,
- nestabilnost vrtložnog strujanja.

Kod ove vrste uzbude, problem je u činjenici da postoji mehanizam pojačanja nestabilnosti koji dovodi do vrlo velikih uzбудnih sila ukoliko se taj mehanizam ne uzme u obzir i ne spriječi njegov nastanak. Mehanizam pojačanja može biti:

- fluido-dinamički,
- fluido-elastični,
- fluido-rezonantni.

Kod fluido-dinamičnog mehanizma nastanka uzbude, uzbudna je sila ovisna samo o uvjetima strujanja, dok je kod ostala dva mehanizma, uzbudna sila ovisna o dinamici strujanja, ali i o dinamici konstrukcije, odnosno cijelog sustava. Glavna značajka fluido-elastičnog i fluido-rezonantnog mehanizma je pojačanje uzbudne sile i „uglavljivanje“ (eng. lock-in) frekvencija uzbude sa vlastitom frekvencijom sustava u određenom rasponu brzina strujanja. Iz tog razloga, fluido-elastičan i fluido-rezonantan oblik su najopasniji oblici ovog izvora uzbude.

Uzbuda izazvana gibanjem je rezultat promjenjivih sila koje nastaju uslijed gibanja konstrukcije kroz fluid. Radi se o tzv. samoinduciranim vibracijama jer prestankom gibanja konstrukcije, nestaje i djelovanje uzbude u sustavu. Gibanje tijela u fluidu uzrokuje nestabilno strujanje fluida oko tijela koje inducira promjenjive uzbudne sile. Opasnost uzbude izazvane gibanjem tijela je u tome što ona ne može biti otkrivena prilikom ispitivanja modela, osim ako se pojavu ne predvidi i ispitivanje ne prilagodi shodno tome. Zbog gibanja konstrukcije, prilikom planiranja ispitivanja, potrebno je da model ima, osim slične geometrije, sličnu masu, prigušenje i krutost, no ti zahtjevi dodatno kompliciraju i poskupljuju ispitivanje. Ovakav oblik uzbude se javlja prilikom, primjerice, treptanja krila zrakoplova (eng. flutter) koje dovodi do vrlo brzog raspada konstrukcije jer se krilo deformira poprečno i torzijski, a u strujanju izaziva polja višeg i nižeg tlaka koja nastoje dodatno povećati poremećaj.

U praksi su strujanjem uzrokovane vibracije vrlo kompleksna pojava jer su u većini slučajeva prisutna dva ili više mehanizama uzbude pa je u tom slučaju potrebno identificirati svaki mehanizam posebno. Rijetki su slučajevi kada je uzbuda posljedica vremenske

promjenjivosti jednog ili više parametara vibracijskog sustava kao što su masa, prigušenje ili krutost.

Dalekovod je vibracijski sustav kod kojeg su prisutna sva tri mehanizma uzbude, a uz to je specifičan i zbog svoje geometrije. Naime, vodič dalekovoda je cilindrično tijelo vrlo velike duljine u odnosu na promjer, a krutost vodiča je relativno mala, što uvjetuje vrlo velik broj bliskih rezonantnih frekvencija.

Vibracije vodiča dalekovoda dijele se na eolske vibracije i galopiranje dalekovoda. Glavna karakteristika eolskih vibracija je osnovni mehanizam nastanka uzbude do kojeg dolazi zbog odvajanja von Karmanovih vrtloga pri umjerenim brzinama vjetra i laminarnom nastrujavanju fluida na vodič. Amplitude vibracija su male, najviše do jednog promjer vodiča, a opasnost kod ovih vibracija je u pojavi zamora materijala konstrukcijskih elemenata dalekovoda.

Galopiranje dalekovoda je mnogo opasnija pojava zbog složenijeg i manje predvidljivog mehanizma uzbude. Amplitude vibracija su veoma velike, uz vrlo niske frekvencije [1].

## 2.1. Eolske vibracije

Eolske vibracije nastaju uslijed nestrujavanja vjetra na konstrukciju, a ime su dobile prema grčkom bogu vjetra Aeolusu. Uzbuda kod ove vrste vibracija ovisi o karakteristikama strujanja vjetra, koje ovise o lokaciji, godišnjem dobu i općenito klimatskim uvjetima. Osim karakteristika strujanja vjetra, veliku važnost ima i geometrija konstrukcije, posebno kod uzbude izazvane nestabilnošću i gibanjem, jer je tu uzrok uzbude upravo opstrujavanje konstrukcije.

Uobičajeni problem koji se javlja kod strujanjem uzrokovanih vibracija je određivanje energije koju u vibracijski sustav unosi gibajući fluid. Većina istraživanja provedenih na tu temu su se temeljila na pretpostavkama laminarnog strujanja. U slučaju kada uzbuda dolazi od vjetra, određivanje snage je dodatno zakomplicirano. Razlog tome je što polje vjetra nije konstantno, već se mijenja s vremenom, a ukoliko je konstrukcija većih dimenzija, uzima se u obzir i prostorna raspodjela polja vjetra. Uz to, struja zraka nije laminarna, nego su prisutne i turbulencije koje znatno utječu na energiju unesenu u sustav. Problem koji se javlja u hladnijim predjelima je promjena geometrije uslijed nakupljanja snijega i leda, čime se mijenja i oblik uzbude. Iz tog razloga, primjerice, dolazi do galopiranja vodiča dalekovoda, često s katastrofalnim posljedicama po konstrukciju.

Prilikom proučavanja eolskih vibracija bilo bi najbolje sve navedene utjecaje uzeti u obzir, no tada bi cijela analiza postala prekompleksna zbog mnogih utjecajnih parametara koje je teško ili gotovo nemoguće odrediti. Iz tog razloga, analizi se pristupa sa usrednjenim vrijednostima i uz niz pojednostavljenja te se problemi eolskih vibracija uglavnom rješavaju kombiniranim pristupom, tj. uz analitički određene parametre dolaze i eksperimentalne provjere tih parametara uz naknadnu korekciju kako bi se smanjile greške.



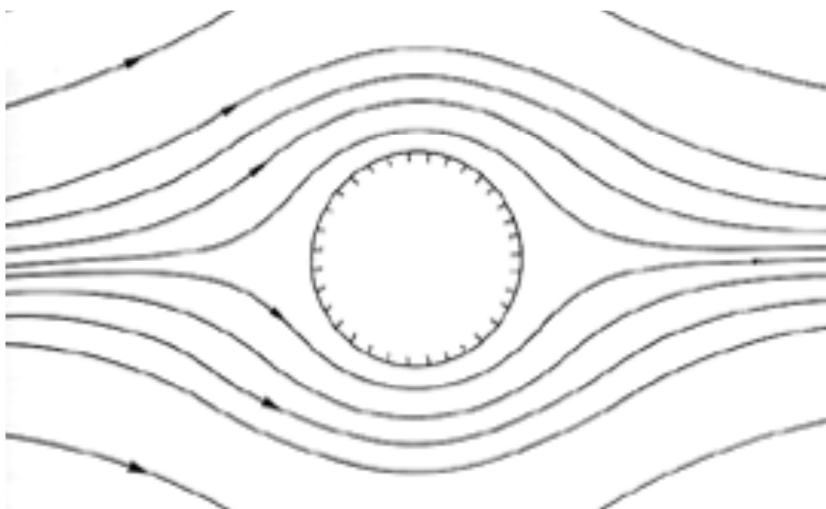
## 2.2. Mehanizam nastanka vibracija

Kada su u pitanju strujanjem uzrokovane vibracije i vodiči dalekovoda, posebnu pozornost potrebno je posvetiti problematici opstrujavanja fluida oko cilindričnih tijela. Ovakvo opstrujavanje je uzrok mnogih vrsta vibracija pa će mehanizam njihovog nastanka biti detaljno objašnjen u sljedećim poglavljima radi stvaranja cjelokupne slike o važnosti učinkovitog rješavanja problematike vibracija kod dalekovoda.

### 2.2.1. Opstrujavanje cilindričnih tijela

Mehanizam opstrujavanja tupih tijela je opisan na primjeru cilindra, kao jednog od najčešćih oblika u inženjerskoj praksi.

Kada se cilindrično tijelo postavi u uniformnu slobodnu struju fluida na način da je ono dvodimenzionalni problem, tj. ista slika strujanja se ponavlja u svakom sloju, fluid je prisiljen skrenuti svoj tok oko tijela. Pri niskim Reynoldsovim brojevima ( $Re$ ), koji su prema [2]  $Re < 5$ , strujnice koje opisuju tok fluida će biti neprekinute glatke linije, tj. tok fluida će ostati nerazdvojen. Eksperimentalnim metodama je utvrđeno da je laminarno strujanje moguće do  $Re = 5$ . Kada između tijela i fluida ne bi bilo trenja (slučaj idealnog fluida), strujanje bi bilo laminarno i pri vrlo visokim Reynoldsovim brojevima. Slika 1 prikazuje strujnice pri ovom načinu opstrujavanja cilindra.



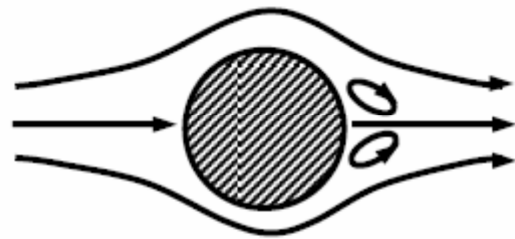
Slika 1. Strujnice pri laminarnom opstrujavanju cilindra

Za slučaj strujanja oko cilindra, Reynoldsov se broj računa prema izrazu 2.1.

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.1)$$

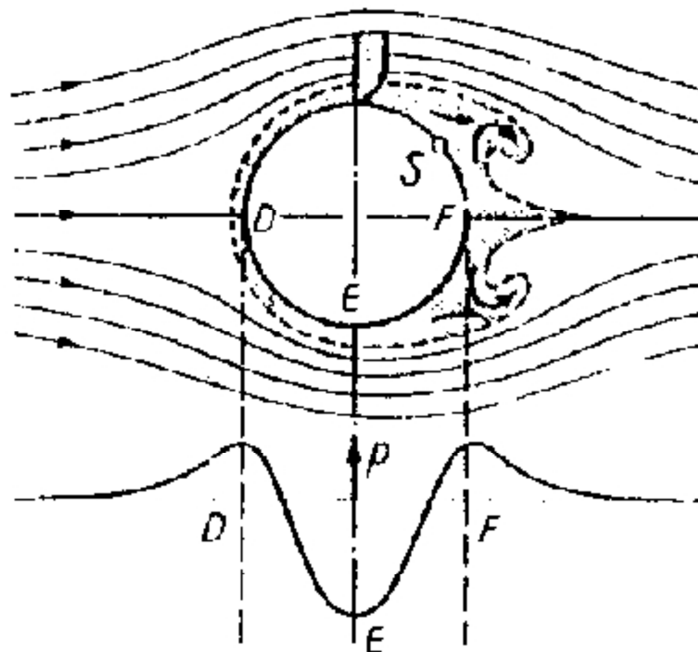
Gdje je  $v$  ustaljena brzina strujanja fluida prije nailaska na cilindar,  $d$  je promjer cilindra (ili ekvivalentna dimenzija necilindričnog tijela), a  $\nu$  je kinematička viskoznost fluida.

Kako se Reynoldsov broj postepeno povećava, kod vrijednosti  $5 < Re < 40$  [2], na zavjetrinskoj strani tijela, tj. strani na kojoj fluid napušta tijelo, se počinju formirati dva vrtloga suprotne rotacije, koji se još uvijek drže za tijelo (slika 2). Iza tijela se formira trag ili „brazda“ (eng. wake), tj. područje jako usporenog strujanja koje, za navedene Reynoldsove brojeve, još uvijek miruje. S porastom Reynoldsovog broja ( $Re > 40$ ), nastali



Slika 2. Nastanak vrtloga pri  $Re > 5$

vrtlozi se počinju odvajati od tijela. Vrtlozi koji se odvoje od tijela putuju zajedno sa strujom fluida. Odvajanje vrtloga se javlja kod realnih fluida kao posljedica trenja, tj. viskoznosti fluida. U području usporenog gibanja iza tijela vlada polje povišenog tlaka. Pojava odvajanja graničnog sloja je direktno vezana uz distribuciju tlaka, tj. polje tlaka oko tijela.



Slika 3. Polje tlaka oko cilindra

Kao što je vidljivo iz slike 3, čestice fluida nastrujavaju na tijelo i u zaustavnoj točki D se stvara područje povišenog tlaka (zaustavni tlak). Gibajući se uz tijelo, čestice fluida ubrzavaju, no kako dolaze do područja povišenog tlaka iza tijela, ne posjeduju dovoljno kinetičke energije da savladaju tlak i dođu do točke F. Razlog da čestice nemaju dovoljno kinetičke energije je taj da izgube značajan dio energije u području od točke D do točke E zbog velikih sila trenja u tankom graničnom sloju. Te čestice, zbog nedostatka energije, ne mogu doći duboko u područje E-F te, zbog otpora, one naposljetku staju. Visoki vanjski tlak zatim uzrokuje da se čestice krenu gibati u suprotnom smjeru, zbog čega nastaje vrtlog koji raste i naposljetku se otkida od graničnog sloja oko tijela te otputuje zajedno sa strujom fluida, stvarajući tako vrtložni trag.

Vrtlozi koji se otkidaju od graničnog sloja nazivaju se von Karmanovi vrtlozi, u čast mađarskom fizičaru Theodoru von Karmanu, koji je proučavao problematiku stabilnosti laminarnog strujanja, turbulencije i granični sloj. Prema tome, kod nastrujavanja fluida na cilindrično tijelo, iza tijela se može uočiti područje u kojem su pravilno naizmjenično raspoređeni von Karmanovi vrtlozi suprotnih orijentacija (slika 4). To se područje naziva trag von Karmanovih vrtloga (eng. von Karman vortex street). Brzina kojom se vrtlozi udaljavaju od tijela je manja od brzine nastrujavanja fluida na tijelo. Istraživanja su pokazala kako je do iznosa Reynoldsovog broja  $Re=5000$  trag prepoznatljiv i pravilan. Pri većim Reynoldsovim brojevima, iza tijela nastaje potpuno turbulentno strujanje i trag nije moguće raspoznati [3].

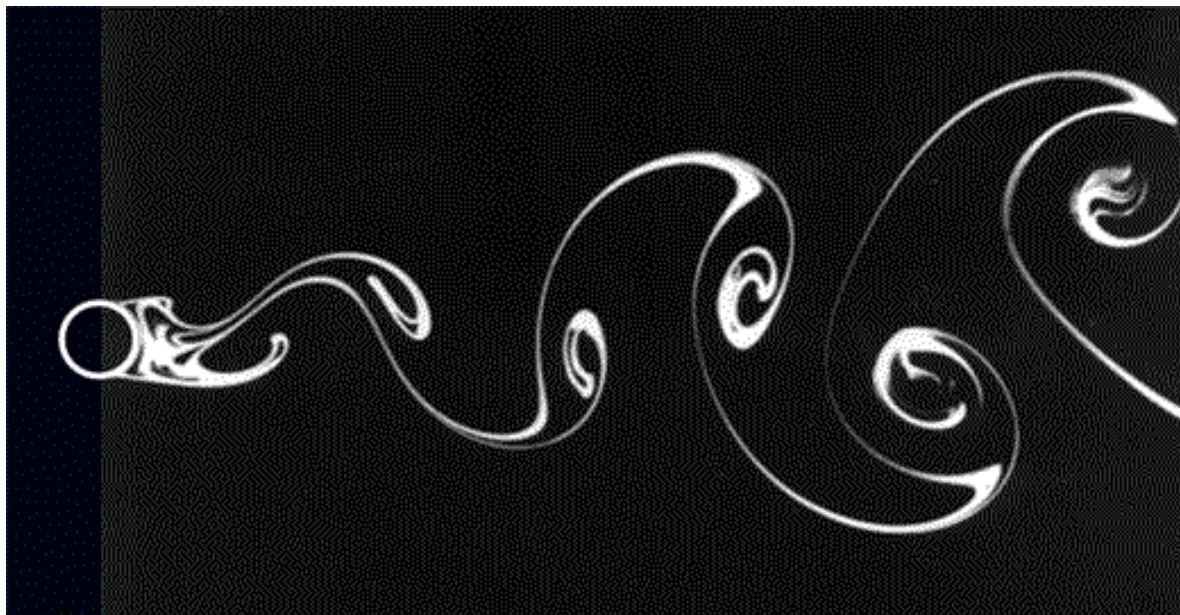
Tijela kod kojih se pojavljuje otkidanje vrtloga imaju velik koeficijent aerodinamičkog otpora, što se može objasniti postojanjem velike razlike u distribuciji tlakova, koja je i razlog otkidanja vrtloga. Tijela kod kojih je prisutno odvajanje graničnog sloja se nazivaju tupa tijela i njima je svojstven omjer dimenzija poprečnog presjeka blizu jedinici. Takva tijela imaju pozitivan gradijent tlaka na zavjetrinskoj strani.

Bezdimenzijska veličina koja opisuje otkidanje graničnog sloja od tupog tijela naziva se Strouhalov broj ( $Sh$ ), prema češkom fizičaru Vincencu Strouhalu. Strouhalov broj predstavlja bezdimenzijsku frekvenciju i računa se prema izrazu 2.2.

$$Sh = \frac{f_s \cdot d}{v} \quad (2.2)$$

Gdje je  $f_s$  frekvencija otkidanja vrtloga. Pojava otkidanja vrtloga s graničnog sloja je do danas jako dobro istražena i postoji mnogo eksperimentalnih rezultata koji dokazuju čvrstu zavisnost Strouhalova broja o Reynoldsovom za niže vrijednosti Reynoldsovog broja. Pri

višim vrijednostima Reynoldsova broja, Strouhalov broj je približno konstantan i iznosi približno  $Sh = 0,19 - 0,22$ .



**Slika 4. Von Karmanovi vrtlozi i trag von Karmanovih vrtloga**

### **2.2.2. Nastanak vibracija uslijed otkidanja vrtloga**

Nakon što smo utvrdili razloge nastanka i otkidanja vrtloga s cilindričnog tijela u struji fluida, moramo odrediti na koji način oni uzrokuju vibracije. Uzbuda uzrokovana otkidanjem vrtloga spada u kategoriju nestabilnošću izazvane uzbude, tj. uzbude izazvane nestabilnošću opstrujavanja tijela. Rezultat te nestabilnosti su velike, samoodržavajuće vibracije.

Da bi moglo doći do pojave vibracija, tijelo mora biti elastično oslonjeno i/ili samo posjedovati elastična svojstva, što svako realno tijelo i posjeduje. Vibracijski sustav posjeduje inercijska svojstva (masa), elastična svojstva (krutost) i prigušna svojstva. Najčešći je izvor prigušenja materijal, no to mogu biti i različiti spojevi konstrukcije. Takav sustav posjeduje jednu ili više rezonantnih frekvencija, čijom se pobudom dobivaju jake vibracije s velikim amplitudama. To se događa kada se frekvencija otkidanja von Karmanovih vrtloga poklopi s jednom od vlastitih frekvencija konstrukcije. U tom slučaju nastaju vibracije velikih amplituda koje mogu dovesti do raspada konstrukcije.

Ovisno o tome kako vrtlozi iza tijela, koji se još drže za granični sloj, međusobno utječu jedan na drugoga i odvajaju se od tijela, ovisi i sila koja će nastati uslijed odvajanja vrtloga. Pri tome, geometrija tijela ima značajan utjecaj. Kako u graničnom sloju vlada nejednolika raspodjela tlaka, kada se vrtlog u kojem je, zbog veće brzine čestica, manji tlak odvoji, na mjestu na kojem se on nalazio djeluje polje višeg tlaka iz područja usporenog strujanja neposredno iza tijela. U istom trenutku, na suprotnoj strani od one s koje se odvojio vrtlog, nalazi se drugi vrtlog koji raste i koji se još nije odvojio, a u kojem je polje nižeg tlaka. Zbog te razlike tlakova na suprotnim stranama tijela, nastaje rezultantna sila koja je gotovo okomita na smjer strujanja fluida. Najveće su amplitude vibracija upravo i okomite na smjer strujanja fluida.

U jednom ciklusu se odvoji po jedan vrtlog sa svake strane pa se može zaključiti da se frekvencija uzbudne sile poklapa s frekvencijom otkidanja vrtloga s tijela. Zbog geometrije poprečnog presjeka tijela, ali i zbog načina odvajanja vrtloga, rezultantna sila nije okomita na smjer strujanja fluida, već je prisutna i komponenta paralelna sa smjerom strujanja fluida. Za razliku od sile okomite na smjer strujanja, sila u smjeru strujanja se mijenja frekvencijom dvostrukom od frekvencije odvajanja vrtloga s tijela. To je posljedica činjenice da se vrtlozi otkidaju samo sa zavjetrinske strane pa i sila djeluje u istom smjeru prilikom otkidanja svakog vrtloga. U jednom periodu se odvoje dva vrtloga, što znači da se uzbudna sila paralelna sa strujom fluida dvaput promijeni od minimalnog do maksimalnog iznosa. Iz tog razloga je frekvencija promjene ove harmonijske sile dvostrukog iznosa od frekvencije odvajanja vrtloga i ta je sila mnogo manjeg iznosa od one okomite na smjer strujanja. Općenite procjene amplitude vibracija u smjeru strujanja variraju od  $0,2 \cdot d$  do  $0,5 \cdot d$ , gdje je  $d$  promjer cilindra. S druge strane, amplitude vibracija okomitih na smjer strujanja mogu ići i do  $1,5 \cdot d$ . Zbog velikih razlika u silama i amplitudama vibracija, u praksi se vibracije u smjeru strujanja fluida najčešće zanemaruju, a u obzir se uzimaju samo dominantne vibracije u smjeru okomitom na smjer strujanja fluida [1].

Za tijelo na koje nastrujava fluid s prisutnim turbulencijama u strujanju, amplitude vibracija se smanjuju u odnosu na one pri laminarnom nastrujavanju. Razlog tome je što se von Karmanovi vrtlozi više ne mogu formirati u punoj veličini (kao u slučaju laminarnog strujanja) pa je rezultat toga manja uzbudna sila i manja unesena snaga u vibracijski sustav.

### 2.2.3. Uglavljivanje frekvencija

Sile koje se javljaju prilikom opstrujavanja tijela ovise i o gibanju samog tijela. Što je gibanje veće, veći je i utjecaj na uzbudne sile, dok se za male pomake taj efekt može zanemariti. Uzimajući u obzir gibanje tijela, dolazi se do slučaja kada je u sustavu istovremeno prisutno više mehanizama uzbude. Uz uzbudu izazvani nestabilnošću, zbog odvajanja vrtloga, prisutna je i uzbuda izazvana gibanjem tijela. Tijelo se giba po harmonijskom zakonu i ono utječe na nestabilnost i uvjete opstrujavanja. Ova kombinacija mehanizama uzbude u konačnici definira resultantnu uzbudu na cjelokupnu konstrukciju.

Utjecaj gibanja tijela na uzbudu predstavlja jedan oblik povratne veze. Preko te povratne veze, tj. interakcije fluida i konstrukcije, dolazi do konačnog postizanja dinamičke ravnoteže preko izjednačavanja impedancija konstrukcije i uzbude. Ova je interakcija najizraženija kada je frekvencija odvajanja vrtloga bliska ili jednaka vlastitoj frekvenciji sustava. Gibanje tijela u fluidu izaziva promjenu u efektivnim dodanim masama (inercija koja je dodana tijelu jer ono mora u gibanju pomicati i dio okolnog fluida) te na taj način može pomicati vlastitu frekvenciju sustava još bliže frekvenciji odvajanja vrtloga. U slučaju da se dvije frekvencije poklope, dolazi do pojave rezonancije.

Kod elastično oslonjenog cilindričnog tijela može doći do pojave da se frekvencija gibanja cilindričnog tijela poklopi s frekvencijom odvajanja vrtloga, što se javlja u određenom rasponu frekvencija. Dakle, zbog efekta dodanih masa, mijenja se vlastita frekvencija sustava na način da se u određenom spektru frekvencija sustav nalazi u rezonanciji. Što je amplituda gibanja tijela veća, to je širi spektar frekvencija u kojima će dolaziti do rezonancije jer je, zbog duljeg djelovanja uzbude na rezonantnoj frekvenciji, amplituda sve veća. Porastom amplitude, raste i efekt dodanih masa, što opet širi frekvencijski raspon u kojem se javlja rezonancija. Ova se pojava naziva „uglavljivanje“ (eng. lock-in) frekvencija i na njega se može utjecati preko prigušenja, ukoliko je taj parametar sustava moguće promijeniti.

## 2.3. Vibracije dalekovoda

Iz prethodnih poglavlja može se zaključiti da su vibracije električnih vodiča dalekovoda veoma kompleksne, sa više uzбудnih mehanizama i popratnih efekata. U ovom poglavlju su opisane posebnosti u slučaju vibracija vodiča dalekovoda. Ovješena užad, poput one na dalekovodima, može vibrirati u dva različita režima:

- eolske vibracije
- galopiranje

### 2.3.1. Eolske vibracije vodiča dalekovoda

Mehanizmi uzbude vodiča dalekovoda su isti kao i za bilo koje drugo ovješeno, cilindrično tijelo i opisani su u prethodnom poglavlju. Frekvencije vibracija vodiča kod eolskih vibracija variraju od 3 Hz do 150 Hz (iznimno 200 Hz), a ovise o brzini vjetra, promjeru vodiča, rasponu dalekovoda i sličnim parametrima. Amplitude vibracija su veličine od nekoliko milimetara do jednog promjera vodiča (iznimno  $1,5 \cdot d$ ).

Kao što je prije spomenuto, kod eolskih vibracija vodiča dalekovoda su prisutna sva tri mehanizma nastanka uzbude. Uzbuda uslijed vanjskih utjecaja nastaje iz razloga da je u struji vjetra uvijek prisutan udio turbulencije. Zbog različite raspodjele tlakova i brzina u polju vjetra, nastrujavanjem takve struje zraka na vodič, nastaju različite sile koje djeluju na vodič. Ova pojava se također može objasniti i pomoću koeficijenta aerodinamičkog uzgona. Razina turbulencija koja je prisutna u struji utječe na koeficijent uzgona koji, uz to, ovisi i o Reynoldsovom broju. Naime, s porastom razine turbulencija, opada koeficijent uzgona, što rezultira manjom uzbudnom silom. Prema tome, turbulencija u strujanju smanjuje unos energije u sustav. Međutim, zbog nastrujavanja vrtloga na vodič, stvara se nejednoliko polje tlaka i brzine na vodiču, što rezultira silama koje djeluju paralelno sa smjerom strujanja. Rezultirajuće vibracije su također paralelne sa smjerom struje fluida, no horizontalne se vibracije dalekovoda uglavnom ne razmatraju jer su razmjerno malene u odnosu na vertikalne vibracije.

Kod eolskih vibracija vodiča dalekovoda, amplitude gibanja vodiča su uglavnom malene pa gibanje nema značajnijeg utjecaja na uzbudu. Tako je problem moguće pojednostaviti pa se analiza eolskih vibracija svodi na promatranje vibracija uzrokovanih

odvajanjem vrtloga s vodiča, kako je ranije opisano. Uz to, uvodi se i pojednostavljenje vezano za provjes, koji se javlja zbog vlastite težine vodiča ovješnog između dva stupa. Prilikom vibracija vodiča stvaraju se stojni valovi čije su duljine pri frekvencijama od 5 Hz do 50 Hz svega nekoliko metara, dok se rasponi između dva stupa mjere u stotinama metara. Budući da su provjesi vodiča u pravilu maleni u odnosu na duljinu raspona, oni se pri razmatranju vibracija vodiča zanemaruju.

Uz to, kod analize se u obzir može uzeti stanje površine tijela i geometrija tijela. Vodič dalekovoda je spiralan i isprepleten od tankih žica. Ta razlika u geometriji utječe samo na činjenicu da uže stvara uzgon i u blizini kritičnog Reynoldsovog broja,  $Re_{CR}$ , koji je definiran kao Reynoldsov broj pri kojem se granični sloj, na strani vodiča na koju nastrujava fluid, mijenja iz laminarnog u turbulentni.

Ukoliko struja fluida nije okomita na uzdužnu os vodiča, već je otklonjena za neki kut, žice s jedne strane će stvarati veći kut sa strujom fluida od onih na drugoj strani. Na strani s većim kutom u odnosu na smjer struje fluida, brže će doći do razvoja turbulentnog graničnog sloja. To izaziva asimetriju odvajanja vrtloga i dovodi do većeg koeficijenta uzgona. Ova pojava dovodi do vibracija vrlo malih frekvencija, ali jako velikih amplituda, slično kao kod galopiranja. Do ovakve pojave dolazi vrlo rijetko jer mora biti zadovoljen niz uvjeta vezanih uz vlastite frekvencije sustava i početno gibanje vodiča. Dakle, u posebnim slučajevima, geometrija vodiča može imati utjecaja na vibracijske karakteristike, no općenito je nije potrebno uzimati u obzir. Također, hrapavost vodiča nije dovoljno velika da spriječi nastanak i odvajanje von Karmanovih vrtloga.

### 2.3.2. Galopiranje

Galopiranje je rijetka pojava vibracija velikih amplituda kod vodiča. Obično se javlja u krajevima s hladnim zimama. Javlja se pri strujanjima kod kojih se razdvojeni smični slojevi fluida ne spajaju iza tijela. Uzbuda je u sustavu uzrokovana gibanjem tijela, a specifično je to što uzbudna sila u sustavu djeluje bez pomaka u odnosu na brzinu, tj. djeluje točno u fazi s brzinom, što rezultira velikim unosom energije u sustav. Općenito, na uzbudnu silu utječe koeficijent aerodinamičkog otpora  $C_D$  i koeficijent aerodinamičkog uzgona  $C_L$ . Na ove koeficijente pak utječe geometrija tijela, vrsta strujanja, rubni utjecaji i dr. S obzirom da gibanje vodiča ima najveći utjecaj na pojavu galopiranja, zbog relativnog gibanja vodiča u



odnosu na struju fluida, mijenja se kut nastrujavanja fluida na uže. Pokazalo se da koeficijent aerodinamičkog uzgona  $C_L$  ima maksimum pri kutu nastrujavanja fluida od  $35^\circ$ , kada sustav postaje nestabilan upravo zbog visoke vrijednosti uzgona. Istraživanja su pokazala i da male promjene geometrije značajno mijenjaju karakteristike koeficijenata otpora i uzgona, koji ovise o kutu nastrujavanja fluida. Te promjene u karakteristikama koeficijenata mogu iznenada dovesti do pojave galopiranja. Kod dalekovoda se promjena geometrije događa zbog nakupina leda na vodičima, a već i nakupljanje vode može izazvati nestabilnosti. Terenska su snimanja pokazala da je frekvencija galopiranja električnih vodiča između 0,08 Hz i 3 Hz, dok amplitude mogu narasti i do 10 metara, a sve se odvija pri niskim brzinama vjetra, primjerice 4,5 m/s.

Danas postoje relativno jednostavne metode kojima je moguće procijeniti podložnost sustava galopiranju. Pojavu je moguće spriječiti promjenom geometrije poprečnog presjeka, no u slučaju dalekovoda, to nije financijski isplativo. Izrada Stockbridge prigušivača bila bi vrlo nepraktična pošto bi zahtjevala jako velike mase zbog male frekvencije vibracija, tako da se koriste druge metode rješavanja problema galopiranja. Ukoliko su se na vodičima stvorile nakupine leda, moguće je povećati struju u vodiču kako bi se one otopile, no sigurnija je opcija isključenje vodiča i čekanje da pojava nestane.

### 3. STOCKBRIDGE PRIGUŠIVAČI

Potreba proučavanja vibracijskog sustava dalekovoda s prigušivačem leži u tome što, tijekom vremena, vibracije vodiča mogu dovesti do zamora materijala na konstrukcijskim dijelovima dalekovoda (slika 5). Uz to, vibracije mogu uzrokovati odvijanje vijaka na dalekovodima pa se, postavljanjem prigušivača na vodiče dalekovoda, smanjuju troškovi preventivnog održavanja.

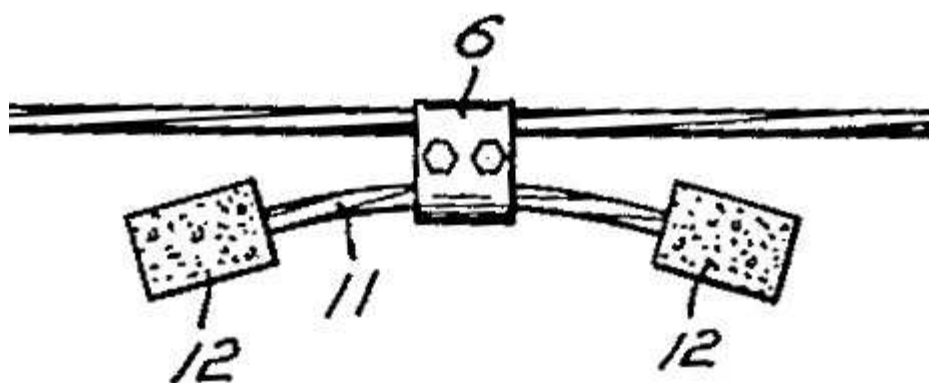
Stockbridge prigušivači vibracija koriste se za prigušenje eolskih vibracija vodiča dalekovoda, kao i za prigušenje vibracija ostale užadi na konstrukcijama. Stockbridge prigušivači su danas jedna od najraširenijih vrsta prigušivača. Svoju raširenost u praktičnoj primjeni duguju najviše jednostavnoj konstrukciji i dobrim karakteristikama.



**Slika 5. Lom vodiča dalekovoda uslijed zamora**

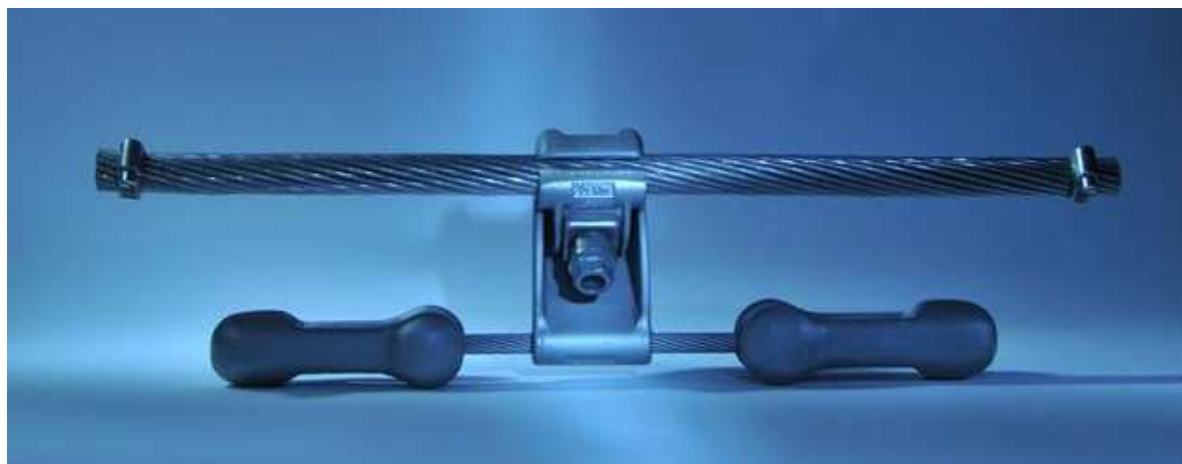
### 3.1. Opis prigušivača

Slika 6 prikazuje Stockbridge prigušivač u verziji za koju je, 1928. godine, George H. Stockbridge dobio patent. Prigušivač se sastoji od stezaljke (6), kojom se steže na vodič dalekovoda. Na stezaljci se nalazi uklješteno uže (11), koje vibracije dalekovoda prenosi do inercijskih elemenata, tj. utega (12), koji su uklješteni na drugoj strani užeta. U stranoj se literaturi to uže, koje prenosi uzbuđu do inercijskih elemenata, naziva i glasničko uže (eng. messenger cable). U originalnoj izvedbi je Stockbridge, koji je promatrao utjecaj ovješanih masa na vibracije vodiča dalekovoda, za utege koristio betonske blokove [4]. Tijekom godina, prigušivač je usavršen, no nije došlo do nikakvih suštinskih promjena. Najveću je promjenu doživjela geometrija utega te materijali od kojih se prigušivač izrađuje.



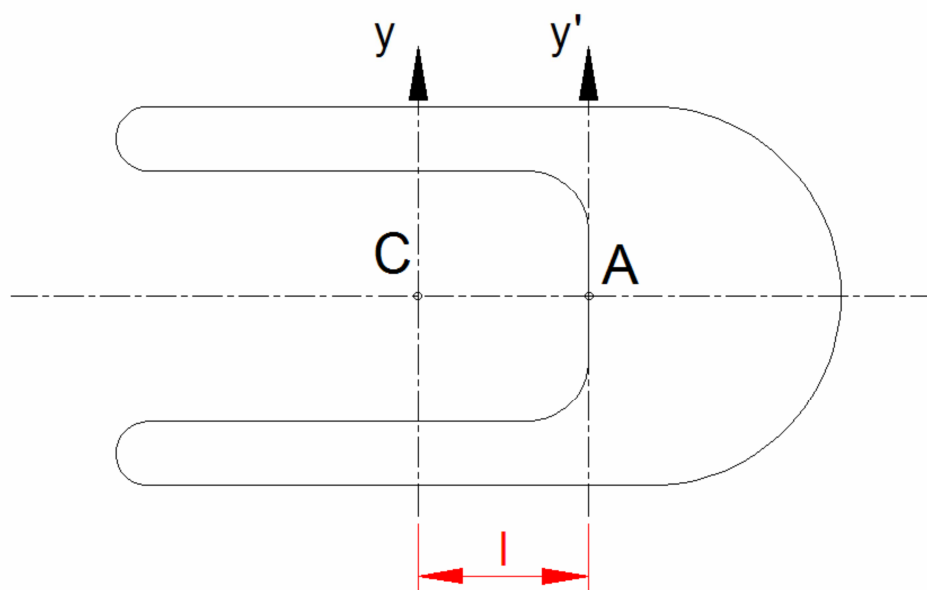
Slika 6. Stockbridge-ov originalni crtež prigušivača s betonskim utezima

Kako je uteg nositelj inercijskih svojstava prigušivača, najbitniji su parametri njegova masa i moment tromosti oko referentne osi. Poznato je kako moment tromosti ovisi o geometriji tijela, tj. raspodjeli mase. Različitim konstrukcijskim izvedbama utega, mogu se dobiti utezi različitih parametara pa se na taj način može podešavati karakteristika prigušivača. U modernim konstrukcijskim rješenjima prigušivača, utezi su najčešće zvonolikog oblika, izrađeni od različitih metalnih legura koje su otporne na atmosferske utjecaje.



**Slika 7. Suvremeni prigušivač kakav se izrađuje u tvrtki Dalekovod**

Na slici 8 je u tlocrtu prikazan jedan oblik utega prigušivača. Glasničko je uže na uteg uklješteno u točki A, a točka C označava težište utega. Prorezi u vertikalnoj ravnini dopuštaju veću slobodu gibanja utega u odnosu na uže, s obzirom na to da, pri velikim pomacima, uže može izlaziti izvan granica utega. Referentni moment tromosti utega je onaj oko osi  $y$ , koja prolazi kroz težište, dok se u proračunima često koristi moment tromosti oko osi  $y'$ . Jednom kada je poznat moment tromosti oko jedne od osi, primjenom Steinerovog pravila, može se odrediti moment tromosti oko bilo koje druge osi. Od utjecaja je i udaljenost između točke uklještenja (A) i težišta utega (C), koja ulazi u matematički model kao jedan od parametara.



**Slika 8. Uteg prigušivača**

Elastična i prigušna svojstva su određena užetom koje povezuje utege sa stezaljkom. Prilikom vibriranja, uža se savija i u njemu se javljaju elastične restorativne sile koje sustav nastoje vratiti u prvobitan, ravnotežni, položaj. Uz to, uža predstavlja i disipator energije tijekom deformiranja, što zbog samog histereznog prigušenja užeta, što zbog trenja koje se javlja između žica od kojih je uža pleteno. Iako se može činiti da bi jednostavnije bilo korištenje nekog drugog elementa za povezivanje utega i stezaljke, što bi omogućavalo i izvođenje preciznijeg matematičkog modela, pleteno se uža koristi upravo zbog dobrih prigušnih svojstava koja poboljšavaju karakteristiku prigušivača.

Na svojstva, tj. karakteristiku prigušivača se može, osim parametrima utega, utjecati i parametrima užeta. Za danu vrstu i promjer užeta, na krutost se može utjecati promjenom duljine glasničkog užeta. Na prigušenje se ne može utjecati na jednostavan način. Ono ovisi o vrsti užeta i promjeru, no teško je odrediti ukupan utjecaj parametara na stupanj prigušenja užeta. U konačnici, na karakteristike prigušivača, za određenu vrstu i promjer užeta, utječu tri parametra: masa utega, moment tromosti utega (geometrija utega) i duljina užeta.

### 3.2. Vrste Stockbridge prigušivača

U praksi postoje dvije vrste Stockbridge prigušivača: simetrični i asimetrični. Ta se podjela temelji na razlici u ranije navedenim parametrima za dvije strane prigušivača, lijevu i desnu. Pretpostavka koja se ovdje uvodi je da gibanje jednog kraja prigušivača ne utječe na gibanje drugog kraja prigušivača, a zajednička im je samo uzbuda. Svaki kraj prigušivača utječe na mehaničku impedanciju koja se mjeri na stezaljci.

Kod simetričnog prigušivača, parametri s jedne strane jednaki su parametrima s druge strane. Takav prigušivač ima samo dvije rezonancije. U općem slučaju, svaki kraj prigušivača ima po dvije rezonancije jer posjeduje dva stupnja slobode gibanja. Na taj način, cijeli prigušivač posjeduje četiri stupnja slobode gibanja, dakle četiti vlastite rezonantne frekvencije. Kod simetričnog se prigušivača po dvije odgovarajuće rezonancije poklapaju pa se u karakteristici efektivno očitavaju dvije rezonancije. Jedna rezonancija je posljedica vertikalne translacije utega, dok je druga posljedica rotacije utega.

Kod nesimetričnog su prigušivača parametri na krajevima različiti, što rezultira sa četiri rezonancije u karakteristici. Upravo se zbog te činjenice u praksi najčešće ili gotovo uvijek koriste asimetrični prigušivači. Njihova je osnovna prednost nad simetričnima da bolje prigušuju vibracije, u širem frekvencijskom rasponu. To je posljedica činjenice da prigušivač najviše energije disipira u rezonanciji te da disipacija energije raste s približavanjem rezonantnoj frekvenciji. Kako asimetrični prigušivač ima četiri rezonancije, u većem rasponu frekvencija se još uvijek nalazi u blizini rezonancije koja daje veću disipaciju energije i bolju učinkovitost.

Osnovni zahtjev na prigušivače vibracija na dalekovodima je da učinkovito prigušuju vibracije, tj. disipiraju energiju, u rasponu frekvencija u kojem se javljaju eolske vibracije. Izvan frekvencijskog raspona za koje su optimirani, prigušivači više nisu efikasni, kao primjerice kod pojave galopiranja vodiča.

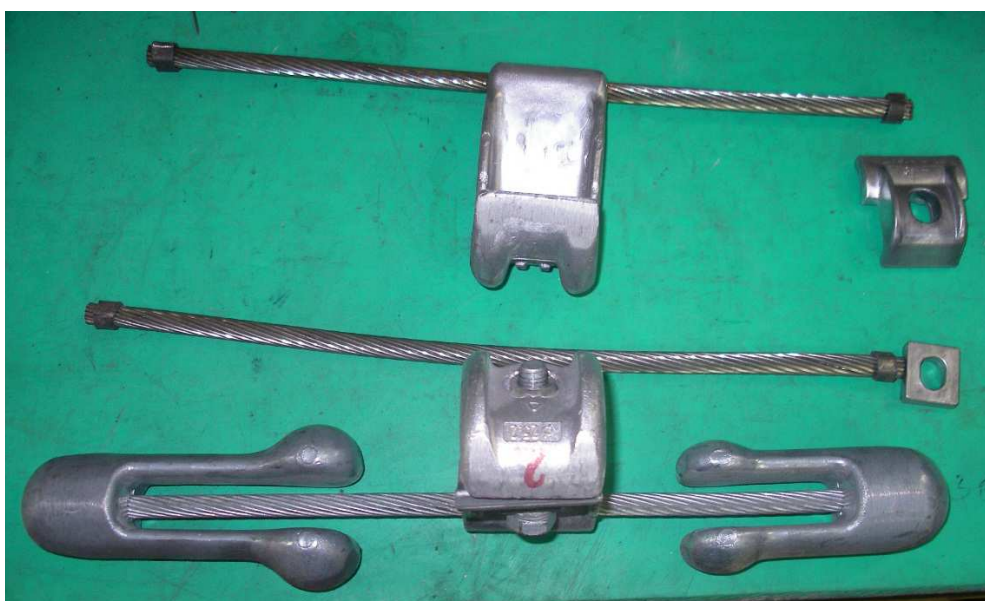
### 3.3. Izrada Stockbridge prigušivača

Tvrtka Dalekovid izrađuje vlastite Stockbridge prigušivače u svom proizvodnom pogonu u Velikoj Gorici. Prigušivači se izrađuju u ljevaonici, koja je fizički odvojena od ostatka pogona zbog mogućih nepoželjnih utjecaja uslijed visokih temperatura koje se razvijaju tijekom postupka lijevanja. U ljevaonici se, osim prigušivača, izrađuju i ostali proizvodi iz širokog asortimana tvrtke Dalekovid, koji zahtijevaju korištenje ove vrste proizvodnog postupka.

Kao što je prije spomenuto, konstrukcija prigušivača je relativno jednostavna, tako da se on sastoji od svega osam dijelova:

- dva utega
- glasničko uže
- tijelo hvataljke
- pričvršćivač
- specijalna podloška hvataljke
- vijak M12
- matica M12

Svi se dijelovi prigušivača izrađuju u ljevaonici, osim glasničkog užeta, vijaka i matica, koji se kupuju. U nastavku su opisani procesi izrade i montaže svih dijelova, kao i materijali od kojih su izrađeni.



**Slika 9. Dijelovi prigušivača**

Proces proizvodnje prigušivača započinje od glasničkog užeta. Rezanjem ulaznog materijala, tj. namotanog užeta, dobiva se glasničko uže. Uže se ne proizvodi direktno u pogonu, nego se kupuje te je sastavljeno od pocinčanih žica koje se ispletu i podmazuju kako bi se dobilo uže. Prije rezanja, na oba kraja užeta se uprešava metalni prsten koji sprječava da se uže, nakon rezanja, rasplete. Potom se, kružnom pilom, odreže ulazni materijal na odgovarajuću duljinu užeta. Nakon toga, na uže se uprešavaju cjevčice koje, osim što sprječavaju da se uže rasplete, također i drže utege koji će se kasnije odlijati na uže.

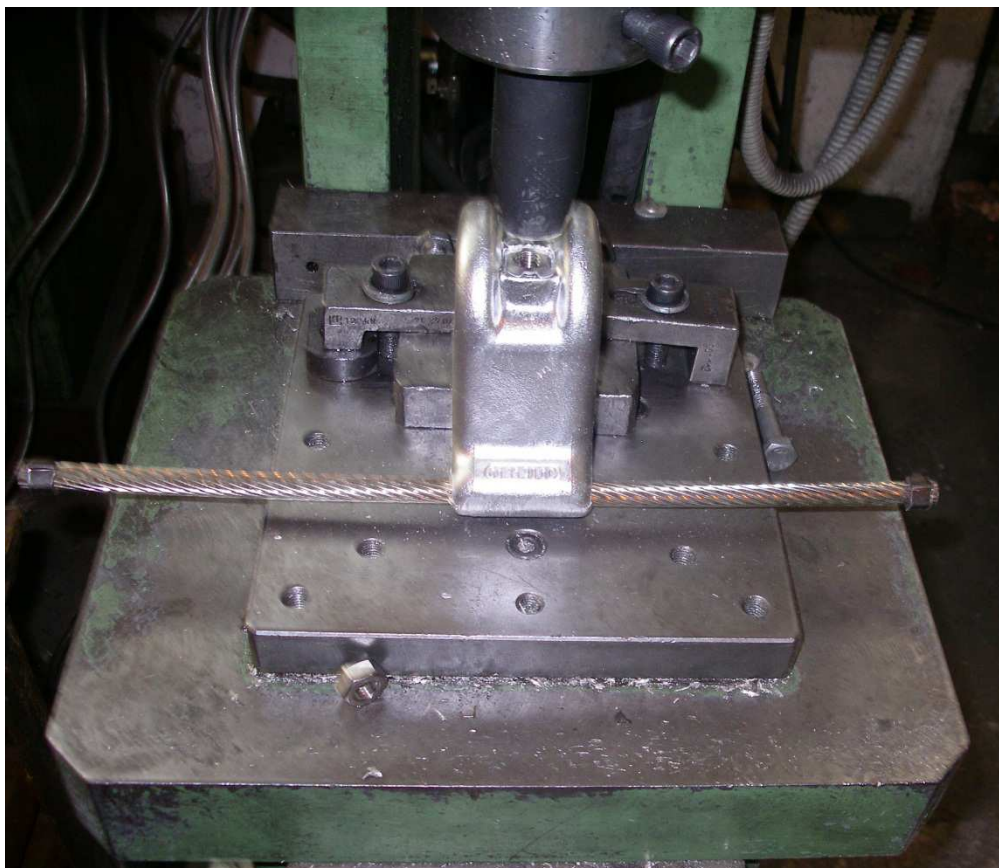
Kada se izradi glasničko uže, na njega se odlije tijelo hvataljke. Tijelo hvataljke je izrađeno od legure aluminija AlMgSi 12, poznatije kao silumin, s udjelom silicija u aluminiju od 12%. Ova legura se koristi za izradu hvataljke jer je otporna na koroziju, dobre je livljivosti, lako se obrađuje obradom odvajanjem čestica, a uz to ima i vrlo visok omjer čvrstoće i električne vodljivosti [5]. Tijelo hvataljke se izrađuje gravitacijskim lijevanjem u stalne kalupe (slika 10) zbog relativno složene geometrije te zato što ovaj postupak omogućava masovnu proizvodnju. Karakteristika lijevanja u stalne kalupe, tj. kokile, je korištenje dvodijelnog metalnog kalupa, koji je oblikovan za precizno i lako otvaranje i zatvaranje. S obzirom da se ovdje radi o leguri nižeg tališta, nije potrebno da kokila bude izrađena od vatrootpornog materijala. Prednosti lijevanja u kokile su dobra dimenzijska točnost i kvaliteta površine te sitnozrnata struktura uslijed brzog skrućivanja, što rezultira čvršćim odljevcima. S druge strane, kod ove vrste lijevanja nije moguće izraditi odljevke velike složenosti oblika (što nije slučaj kod prigušivača), a uz to, kalupi mogu biti vrlo skupi.



**Slika 10. Kokila za lijevanje tijela hvataljke**



Kada je postupak lijevanja tijela hvataljke gotov i ono se izvadi iz kokile, slijedi odstranjivanje uljevnog sistema pomoću pile. Nakon toga, potrebno je još brusilicom odstraniti srh sa hvataljke i uprešati maticu M12 u tijelo hvataljke (slika 11).



**Slika 11. Uprešavanje matice u tijelo hvataljke**

Ovdje treba napomenuti da se i silumin i cink, koji se koristi za izradu utega, tale u indukcijskim pećima (slika 12), koje također proizvodi Dalekovod. Kod indukcijskih peći, prolaskom izmjenične struje kroz zavojnicu peći (induktor) inducira se magnetsko polje u materijalu. Inducirana struja uzrokuje brzo zagrijavanje i taljenje. Prednost indukcijskih peći je u tome što elektromagnetska sila uzrokuje i miješanje rastaljenog metala. Kako metal nije u dodiru s grijačim tijelom, moguće je dobro kontrolirati okolnu atmosferu, što rezultira talinom visoke kvalitete i čistoće.



**Slika 12. Taljenje metala u indukcijskoj peći prije lijevanja**

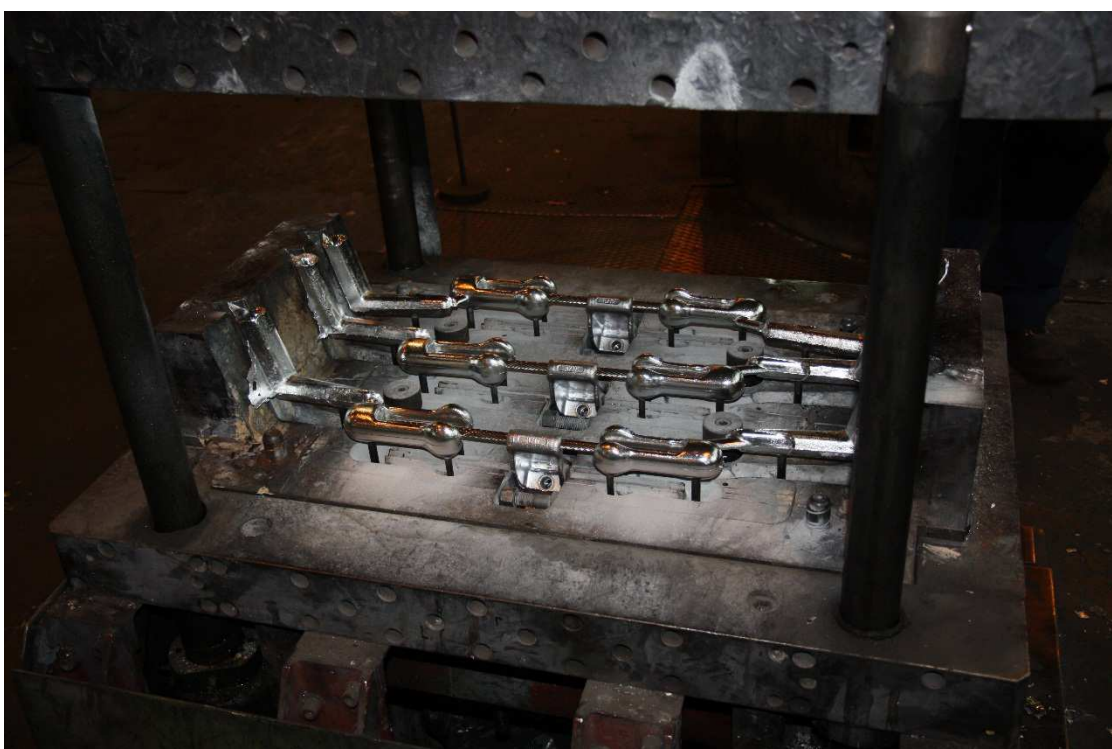
Silumin se, u indukcijskim pećima, zagrijava na 700 °C do 750 °C, ovisno o debljini stijenka, dok se cink mora zagrijati na 460 °C do 480 °C da bi ga se moglo lijevati. Transport taline se vrši u ljevačkom loncu, pomoću granika, dok se ulijevanje u kokile vrši ljevačkom žlicom.

Nakon što se tijelo hvataljke odlije na užu i matica upreša, hvataljka se stavlja u kokilu u kojoj se utezi lijevaju na užu (slika 13). Utezi su izrađeni od cinka kojem je dodano 2% do 3% aluminija. Cink, osim što je otporan na koroziju, ima i visoku livljivost, nisku temperaturu taljenja te dobru tecljivost koja omogućuje jednostavno lijevanje. Kada se prigušivači izvade iz kokile, potrebno je otpiliti uljevni sistem i brušenjem odstraniti srh sa utega. Ovdje treba napomenuti da, iako masa i geometrija utega imaju utjecaj na snagu prigušivanja, smanjenje mase i dimenzija do kojih dolazi prilikom brušenja utega su toliko male da se njihov utjecaj na snagu prigušivanja može zanemariti. S druge strane, čak i mala razlika u duljini krakova užeta može dovesti do zamjetne promjene snage prigušivanja. Iz tog razloga će se u sljedećem poglavlju razmatrati utjecaj dimenzija krakova na snagu prigušivanja te sposobnost procesa lijevanja utega prigušivača.





**Slika 13. Kokila za lijevanje utega**



**Slika 14. Odliveni utezi sa uljevnim sistemom, prije vadenja iz kokile**

Uz prije spomenute dijelova, lijevanjem se također izrađuje i pričvršćivač i specijalna podloška hvataljke. Ovi dijelovi se izrađuju od istog materijala kao i tijelo hvataljke, silumina. Pričvršćivač služi za pričvršćivanje tijela hvataljke na vodič dalekovoda, pomoću vijka M12, dok se specijalna podloška hvataljke koristi iz razloga da na većoj površini pritišće hvataljku na vodič. Hvataljke se izrađuju za promjere vodiča dalekovoda od 25 mm do 30 mm.

Na kraju se vrši kompletiranje, tj. na hvataljku prigušivača se stavljaju svi dijelovi koji već nisu na njoj (vijak, specijalna podloška, pričvršćivač) i time se dobiva gotov prigušivač, spreman za isporuku.

#### 4. ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA STOCKBRIDGE PRIGUŠIVAČA

Karakteristike Stockbridge prigušivača se promatraju i ocjenjuju preko tri dijagrama koji redom prikazuju apsolutnu vrijednost mehaničke impedancije, fazni kut impedancije (kut između brzine i sile koja djeluje na stezaljku prigušivača) te disipiranu snagu. Sve veličine u dijagramima se prikazuju u ovisnosti o frekvenciji vibracija. Ova tri dijagrama u potpunosti opisuju vibracijske karakteristike prigušivača koje su relevantne za njegovo ispitivanje i koje zahtijeva norma [6].

Mehanička impedancija je mjera otpora kojom se konstrukcija odupire gibanju kada se na nju djeluje silom. Impedancija povezuje silu i brzinu u zadanoj točki konstrukcije. U slučaju Stockbridge prigušivača, sila ne djeluje na utege, nego je uzbuda kinematička, preko stezaljke prigušivača. Impedancija je kod prigušivača definirana kao omjer sile koja djeluje na stezaljku i brzine stezaljke te je tako definirana mehanička impedancija maksimalna u rezonancijama prigušivača. Razlog tome je taj što je u rezonancijama amplituda gibanja utega prigušivača maksimalna pa za zadano gibanje stezaljke, prigušivač stvara najveću silu na stezaljci. Mehanička impedancija koja se prikazuje u dijagramima, a koja opisuje karakteristiku prigušivača, računa se prema izrazu 4.1.

$$Z = \frac{F}{v} \quad (4.1)$$

Od navedenih veličina koje opisuju karakteristiku prigušivača, mehanička impedancija je vrlo bitna, pošto se ona koristi za određivanje amplituda vibracija vodiča dalekovoda.

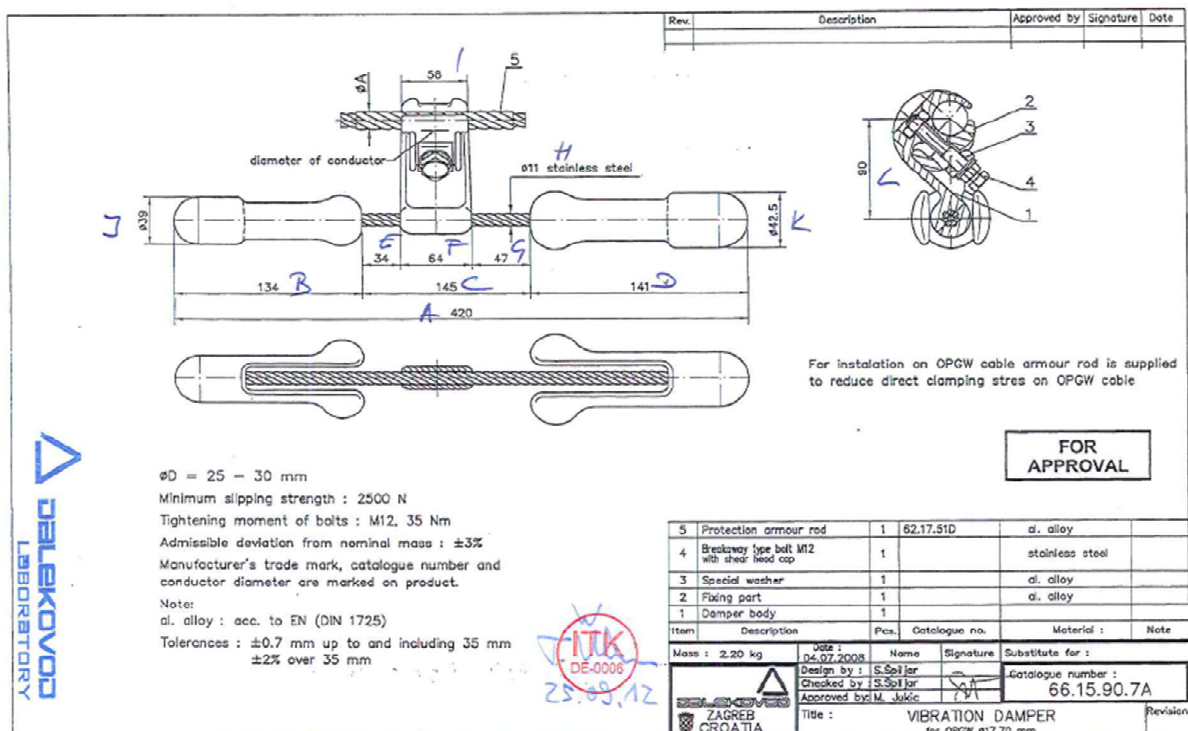
Od velike važnosti za vibracije ovješnog vodiča dalekovoda je i snaga koju disipira prigušivač kao pokazatelj efikasnosti prigušivača u zadanom frekvencijskom rasponu. Snaga koju disipira prigušivač je definirana kao umnožak sile na stezaljci i brzine stezaljke. Disipirana snaga je funkcija vremena, a ovisi o uzbuđi i parametrima prigušivača. Snaga koju disipira prigušivač i koja se prikazuje u dijagramima, računa se prema izrazu 4.2.

$$P = \int_0^T F(t) \cdot v(t) dt \quad (4.2)$$

#### 4.1. Provedba ispitivanja

Ispitivanja prigušivača su provedena u Dalekovodovom laboratoriju, nerazornim ispitivanjem, korištenjem uređaja i opreme koji će biti navedeni u nastavku. Ispitivanja su provedena u skladu s normom za ispitivanje karakteristika prigušivača IEC 61897: 1998 [6]. Uzorkovanje za provedbu ovih ispitivanja je obavljeno u četiri navrata, u Dalekovodovom proizvodnom pogonu u Velikoj Gorici, gdje je izuzeto ukupno dvadeset uzoraka.

Prije provedbe samog ispitivanja, mjere se sve dimenzije koje utječu na karakteristike prigušivača. Kao što je prije spomenuto, najveći utjecaj na snagu koju disipira prigušivač imaju duljine krakova glasničkog užeta, dok ostale dimenzije nemaju tako velik utjecaj, naravno, ako su unutar granica tolerancije. Tolerancije od nazivne dimenzije su  $\pm 0.7$  mm za dimenzije do 35 mm te  $\pm 2\%$  za dimenzije preko 35 mm. Uz to, mase utega su vrlo ujednačene, a utjecaj na snagu zbog eventualne razlike u masi, do koje može doći zbog brušenja, je zanemariv. Također, u analizi ne bi bilo dobro uzimati u obzir sve parametre prigušivača jer bi u tom slučaju bilo vrlo teško odrediti međuovisnost između pojedinih parametara i snage. Iz tih će se razloga, analiza provesti upravo na temelju najutjecajnijih parametara, a to su dimenzije krakova užeta  $E$  i  $G$  (slika 15).



**Slika 15. Nacrt prigušivača s označenim izmjerenim dimenzijama**

#### 4.1.1. Opis ispitivanja

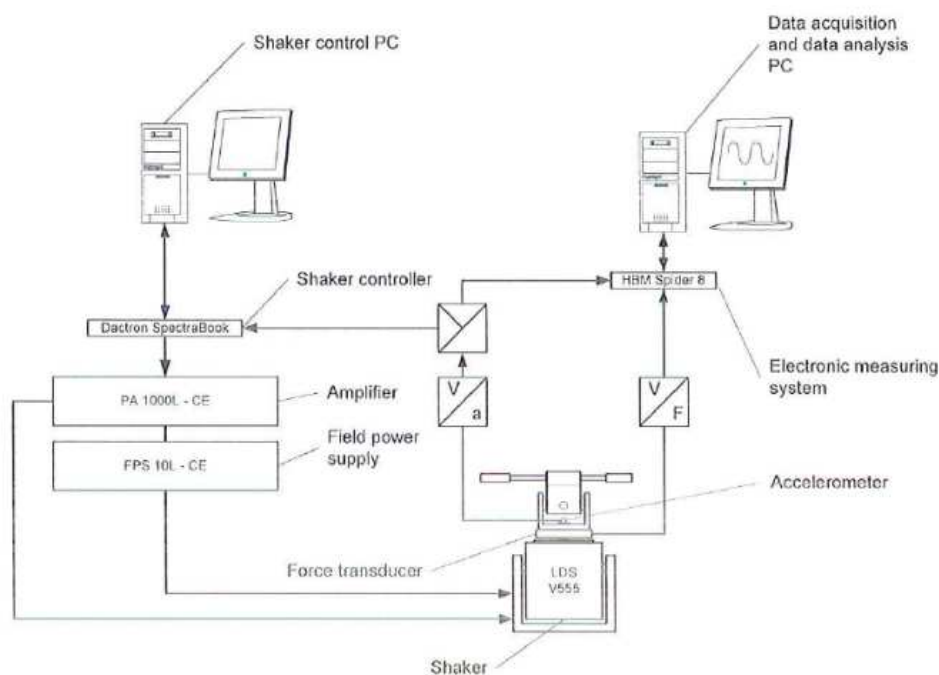
Prije je spomenuto da je snaga koju disipira prigušivač definirana kao umnožak sile na stezaljci i brzine stezaljke. Ove dvije veličine je potrebno izmjeriti tijekom ispitivanja prigušivača, koje se provodi pomoću elektrodinamičkog vibratora Ling Dynamic Systems (LDS) V555 (slika 16), uz koji se koristi i pojačalo LDS 1000L te uređaj za napajanje LDS FPS 10L. Ovaj uređaj može postići maksimalnu silu uzbude od 940 N, u rasponu frekvencija od 5 Hz do 6300 Hz, dok mu je najveća nosivost 5 kg. Prigušivač koji se ispituje pričvrsti se na prihvatnicu koja na sebi ima ugrađen uređaj za mjerenje sile Burster Gernsbach 8531. Prihvatnica je okrugla, kruta šipka čiji promjer je dovoljno velik da se na nju može pričvrstiti hvataljka prigušivača. Prihvatnica i vibrator spojeni su vijcima. Za mjerenje ubrzanja, koristi se piezoelektrični akcelerometar PCB PIEZOTRONICS Inc. model 333B35, s integriranom elektronikom i male mase (4,2 g), koji je kruto spojen na prihvatnicu. Ovaj akcelerometar ima raspon ubrzanja od  $\pm 490 \text{ m/s}^2$ , u rasponu frekvencija od 2 Hz do 3000 Hz. Brzina stezaljke se računa iz izmjenjenog ubrzanja. Uređaj za upravljanje vibratorom, Dactron SpectraBook Controller i njegov programski paket, Dactron Shaker Control, upravljaju vibratorom koristeći signal dobiven s akcelerometra.



Slika 16. Prigušivač na vibratoru LDS V555



Brzina hvataljke prigušivača je konstantna, na 100 mm/s, u skladu s normom IEC 61897. Prema istoj normi, raspon frekvencija tijekom ispitivanja varira između 5 Hz i 200 Hz, dok je vrijednost za koju se povećava frekvencija 0,2 dekade u minuti. Signali s akcelometra i uređaja za mjerenje sile se prikupljaju i mjere korištenjem elektroničkog sustava za mjerenje HBM Spider 8, dok se snimanje podataka provodi pomoću programskog paketa HBM Catman 32. Impedancija, fazni kut između signala sile i brzine te snaga se izračunavaju nakon prikupljanja podataka.



**Slika 17.** Shema uređaja za upravljanje vibratorom i mjerenje signala sa senzora

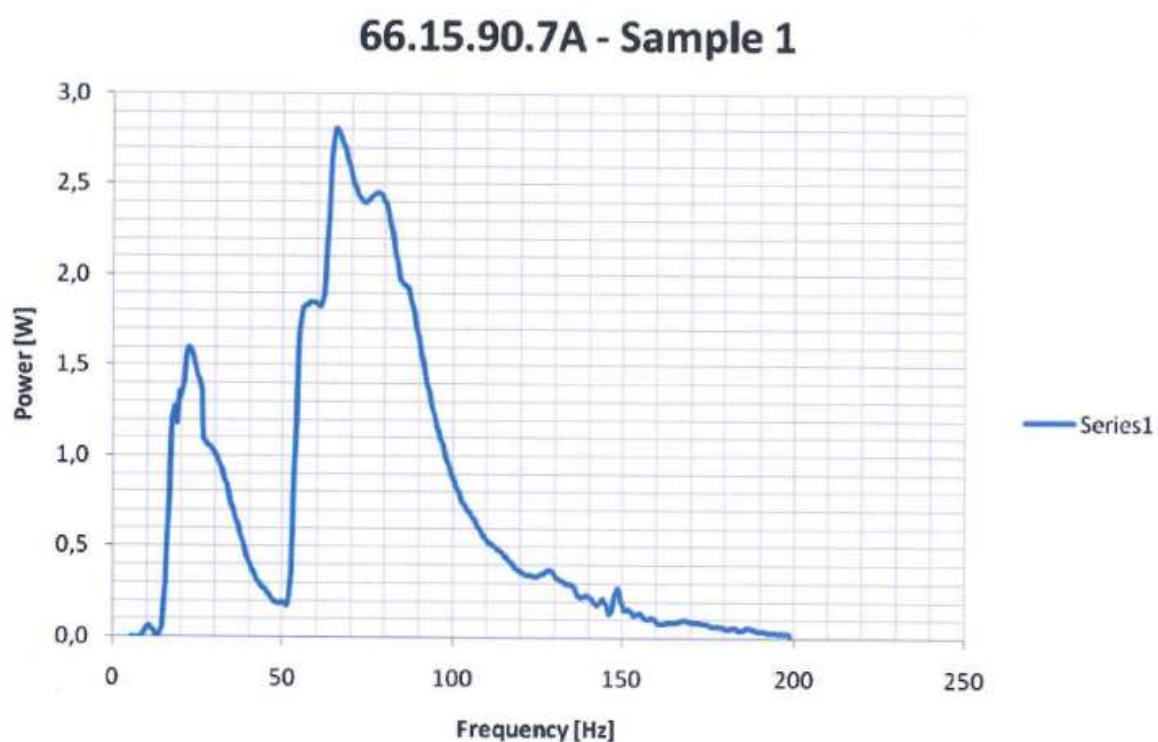
#### 4.1.2. Rezultati ispitivanja

Nakon prikupljanja podataka, programski paketi izrađuju dijagrame pojedinih karakteristika prigušivača u ovisnosti o frekvenciji vibracija. Slika 18, kao primjer, prikazuje dijagram snage koju disipira jedan od uzorkovanih prigušivača. Za izradu dijagrama potrebno je izračunati rezonantne frekvencije za svaki uzorak te minimalne snage koje disipira prigušivač na tim frekvencijama. U tablici 1 su redom prikazana mjerenja i izračuni rezonantnih frekvencija i snaga, koji su izvršeni u Dalekovodovom laboratoriju.



Tablica 1. Pregled rezultata ispitivanja prigušivača

Broj uzorka	Dimenzije krakova glasničkog užeta		Rezonantne frekvencije		Minimalna disipirana snaga na rezonantnoj frekvenciji	
	$E$ , mm	$G$ , mm	$f_1$ , Hz	$f_2$ , Hz	$P_1$ , W	$P_2$ , W
1	33,9	46,3	21,97	65,08	1,59	2,80
2	33,8	46,7	25,93	62,27	1,83	3,36
3	33,6	46,3	22,69	65,34	1,54	2,76
4	34,6	47,0	21,87	62,74	1,85	3,14
5	34,6	46,8	25,86	76,90	1,50	3,18
6	34,5	47,7	27,36	78,86	1,62	3,57
7	34,6	47,8	21,96	66,97	1,49	2,69
8	34,7	47,0	22,36	70,66	1,57	3,03
9	33,7	47,9	23,34	72,77	1,76	4,06
10	34,7	47,9	26,05	77,60	1,84	3,56
11	34,2	46,0	23,97	83,97	1,48	3,37
12	34,5	46,0	28,88	79,98	1,95	4,23
13	35,0	47,0	23,16	66,31	1,48	2,90
14	35,0	47,9	24,81	85,34	1,50	2,97
15	33,6	47,8	26,51	77,15	1,87	3,56
16	33,7	47,7	23,98	83,98	1,48	3,38
17	33,7	46,2	20,94	74,61	1,70	2,83
18	33,7	47,7	23,81	73,24	1,77	4,06
19	34,7	47,2	28,88	79,98	1,95	4,24
20	34,5	47,8	20,95	72,37	1,60	2,87



Slika 18. Dijagram snage koju disipira prvi uzorkovani prigušivač u ovisnosti o frekvenciji

#### 4.1.3. Tipski atest

Tipski atest je set testova koji se provode kod novog proizvoda kako bi se utvrdilo da li je proizvod sukladan zahtjevima specifikacija, ugovora ili propisa. U svrhu testiranja usklađenosti proizvoda sa standardima razvijeni su mnogi uređaji i postupci ispitivanja. Proizvođači opreme i dobavljači, usklađivanjem sa standardima, osiguravaju optimalnu kvalitetu svojih proizvoda i usluga.

U tablici 2 su prikazane rezonantne frekvencije i disipacije snage na tim frekvencijama, prema tipskom atestu za ispitivani tip Stockbridge prigušivača.

**Tablica 2.      Tipski atest ispitivanog tipa Stockbridge prigušivača**

Sample 1		Sample 2		Sample 3	
$f_1 = 27,10 \text{ Hz}$	$P_1 = 1,97 \text{ W}$	$f_1 = 26,17 \text{ Hz}$	$P_1 = 1,85 \text{ W}$	$f_1 = 27,90 \text{ Hz}$	$P_1 = 2,03 \text{ W}$
$f_2 = 87,01 \text{ Hz}$	$P_2 = 3,50 \text{ W}$	$f_2 = 75,75 \text{ Hz}$	$P_2 = 3,37 \text{ W}$	$f_2 = 95,05 \text{ Hz}$	$P_2 = 3,32 \text{ W}$

Minimalna i maksimalna prva rezonantna frekvencija, dobivena tipskim atestom, je 26,17 Hz i 27,90 Hz, što znači da bi prve rezonantne frekvencije ispitivanih prigušivača, uz tolerancije, trebale biti u rasponu između 20,94 Hz i 33,48 Hz. Minimalna i maksimalna druga rezonantna frekvencija, dobivena tipskim atestom, je 75,75 Hz i 95,05 Hz, što znači da bi druge rezonantne frekvencije ispitivanih uzoraka, uz tolerancije, trebale biti u rasponu između 60,6 Hz i 114,04 Hz.

Minimalna snaga na prvoj rezonantnoj frekvenciji, također dobivena tipskim atestom, je 1,85 W, što znači da bi snaga ispitivanih prigušivača na prvoj rezonantnoj frekvenciji, uzimajući u obzir tolerancije, trebala biti veća od 1,48 W. Minimalna snaga na drugoj rezonantnoj frekvenciji u tipskom atestu je 3,32 W pa bi, uz tolerancije, snaga ispitivanih uzoraka na drugoj rezonantnoj frekvenciji trebala biti iznad 2,66 W.

Navedene gornje i donje granice ćemo kasnije koristiti u statističkoj analizi ispitivanih prigušivača.

## 4.2. Statistička analiza rezultata ispitivanja

Statistička analiza dobivenih rezultata ispitivanja prigušivača provodi se u cilju kontrole kvalitete. Kvaliteta u užem smislu, tj. tehnička strana kvalitete, pretpostavlja ispunjavanje svih tehničkih zahtjeva na kvalitetu proizvoda ili usluge. Suvremena kontrola kvalitete je koncentrirana na elemente procesa, a ne na značajke proizvoda. Prema tome, najznačajnija mjera kvalitete u užem smislu je veličina rasipanja značajke procesa, dok je najočitiji argument poboljšanja kvalitete procesa, stalno smanjivanje rasipanja. Prije početka kontrole procesa, treba znati koji su ključni elementi procesa koji utječu na sve proizvode te kakva je međusobna interakcija tih elemenata procesa [7].

Za statističko praćenje procesa treba odrediti sljedeće elemente:

- jednu ili više ključnih značajki kvalitete koje treba pratiti,
- mjerni postupak,
- statističku metodu,
- veličinu i broj uzoraka,
- učestalost uzimanja uzoraka.

Statistička analiza će se provesti pomoću programskog paketa za statističku analizu, Minitab, koji je razvijen na Pennsylvania State University te se danas često koristi kod različitih metoda uvođenja unaprijeđenja procesa.

### 4.2.1. Kontrolne karte

Većina kontrolnih karata koje se danas primjenjuju u kontroli kvalitete nastale su u drugoj polovici dvadesetih godina prošlog stoljeća, a njihov je autor bio dr. Walter A. Shewhart. Kontrolne karte se koriste za praćenje varijacija procesa u vremenu te se, prema vrsti raspoloživih podataka iz procesa, dijele na atributivne i mjerljive. One pokazuju je li proces pod kontrolom, tj. da li varira samo zbog slučajnih utjecaja.

Tehnika kontrolnih karata sastoji se od uzimanja većeg broja malih uzoraka iz procesa, u slučajnim obilascima. Na temelju provedenih mjerenja uzoraka računa se jedan ili više

statističkih parametara. Vrijednosti statističkih parametara uzoraka predmet su praćenja primjenom odgovarajuće kontrolne karte.

Na svakoj kontrolnoj karti treba odrediti kontrolne granice i središnju liniju. Središnja linija procesa, *SL* (eng. Central line, *CL*) predstavlja liniju aritmetičke sredine statističkog parametra koji se prati kontrolnom kartom. Kontrolne granice su granice unutar kojih se može dozvoliti varijabilnost procesa. Postoje donja kontrolna granica, *DKG* (eng. Lower control limit, *LCL*) i gornja kontrolna granica, *GKG* (eng. Upper control limit, *UCL*). Treba imati na umu da su kontrolne granice statističke granice, koje nisu povezane s granicama zahtjeva. Uz to, kontrolne granice se uvijek postavljaju na granice rasipanja  $\pm 3\sigma$  statističkog parametra koji se prati kontrolnom kartom, tj. računa iz uzoraka. U slučaju da se podatak nađe izvan kontrolne granice, to pokazuje da se u procesu, statistički promatrano, dogodio ne slučajan, već značajan uzrok odstupanja. To nipošto ne znači da proces daje nesukladne proizvode.

Kada nema podataka izvan kontrolnih granica, koristi se termin „proces je pod kontrolom“. To je statistički termin kojim se pokazuje da proces varira samo pod utjecajem slučajnih, procesu svojstvenih, utjecaja. Za proces pod kontrolom često se koristi i termin „stabilan proces“. Kontrolne karte se mogu i trebaju primjenjivati, kako za procese koji daju nesukladne proizvode, tako i za sposobne procese.

Ciljevi primjene kontrolnih karata su sljedeći:

- dovođenje procesa u stanje statističke kontrole, odnosno u stanje „pod kontrolom“,
- utvrđivanje trendova i pomaka procesa u cilju zaštite od neželjenih rezultata, tj. pojave nesukladnih proizvoda,
- utvrđivanje potreba za remontom ili nabavom nove opreme elemenata procesa,
- dobivanje svih saznanja o mogućnostima poboljšanja procesa i mogućnostima postizanja zahtijevane kvalitete proizvoda, tj. procjenjivanje sposobnosti procesa.

#### 4.2.2. Sposobnost procesa

Sposoban proces je definiran kao onaj proces koji može proizvoditi jedinice unutar zahtijevanih granica, tj. unutar granica specifikacije te se procjenjuje računanjem tzv. indeksa sposobnosti procesa. Računanje i pravilna interpretacija indeksa sposobnosti procesa temelji se na sljedećim pretpostavkama:

- Raspodjela podataka se može aproksimirati normalnom razdiobom,
- Proces je „pod kontrolom“,
- Pouzdana procjena sposobnosti procesa može se donijeti samo temeljem praćenja procesa primjenom odgovarajuće kontrolne karte i nakon dovođenja procesa u stanje „pod kontrolom“.

Temeljni uvjet sposobnosti procesa glasi da je proces sposoban ako je raspon zahtjeva veći ili jednak od raspona procesa. Raspon zahtjeva (tolerancijsko područje)  $T$  je područje između gornje ( $USL$ ) i donje granice zahtjeva ( $LSL$ ), odnosno  $T = USL - LSL$ . Raspon procesa podrazumijeva područje unutar  $\pm 3$  standardna odstupanja ( $6 \cdot \sigma$ ) u odnosu na sredinu procesa (99,73% površine ispod krivulje normalne raspodjele kojom se aproksimira proces). Prema tome, temeljni uvjet sposobnosti procesa je:  $T \geq 6 \cdot \sigma$

Indeksi sposobnosti procesa računaju se nakon odvijanja procesa tijekom relativno dugog vremenskog razdoblja u kojem su se mogli pojaviti svi mogući utjecaji varijacija procesa.

Iznos indeksa  $C_p$  neposredno pokazuje da li proces može biti sposoban. Što je iznos indeksa veći, to je rasipanje procesa manje. Potencijalna sposobnost  $C_p$  (eng. Potential capability), dobiva se iz temeljnog uvjeta sposobnosti:

$$C_p = \frac{T}{6 \cdot \sigma} \quad (4.3)$$

Standardno odstupanje ( $\sigma$ ) se procjenjuje analizom odgovarajuće kontrolne karte. Ovako procijenjeno standardno odstupanje naziva se „standardno odstupanje iz uzoraka“ ili „unutarnje standardno odstupanje“ i računa se prema izrazu 4.4.

$$\sigma = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (4.4)$$

Gdje je  $\overline{MR}$  srednja vrijednost pokretnog raspona, a  $d_2$  empirijski faktor koji je veza između raspona i standardne devijacije te ovisi o broju podataka.

Iznosi indeksa donje potencijalne sposobnosti  $C_{pL}$  (eng. Lower potential capability) i gornje potencijalne sposobnosti  $C_{pU}$  (eng. Upper potential capability) računaju se korištenjem sljedećih izraza:

$$C_{pL} = \frac{sredina\ procesa - L}{3 \cdot \sigma} \quad (4.5)$$

$$C_{pU} = \frac{U - sredina\ procesa}{3 \cdot \sigma} \quad (4.6)$$

U prethodnim izrazima, sredina procesa je središnja linija primijenjene kontrolne karte. U slučaju računanja statističkih parametara iz svih podataka, sredina procesa odgovara aritmetičkoj sredini tih podataka.

Demonstrirana izvrsnost  $C_{pk}$  predstavlja korigiranu vrijednost indeksa  $C_p$  zbog necentriranosti i računa se prema izrazu 4.7.

$$C_{pk} = (1 - k) \cdot C_p \quad (4.7)$$

Gdje je  $k$  broj uzoraka. Ako je proces idealno centriran,  $k$  je jednak 0 i  $C_{pk} = C_p$ .

#### 4.2.3. Praćenje procesa X - MR kontrolnom kartom

X – MR (eng. moving range) karte spadaju u skupinu kontrolnih karata za mjerljive karakteristike u koje se unose rezultati individualnih mjerenja. Upotrebljavaju se u situacijama kada je ograničena mogućnost dobivanja podataka ili, zbog tehnološke prirode procesa, nije moguće uzeti više od jednog podatka u uzorku.

U daljnjoj analizi ćemo koristiti upravo ovu vrstu kontrolnih karata, zbog relativno malog broja podataka, dobivenih iz 20 uzoraka.

Kontrolne granice za kretanje individualnih vrijednosti mjerenja računaju se prema izrazu 4.8.

$${}^G_KG_x = \bar{x} \pm 2,66\overline{MR} \quad (4.8)$$

gdje su:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k} \quad (4.9)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} MR}{k-1} \quad (4.10)$$

pri čemu je:

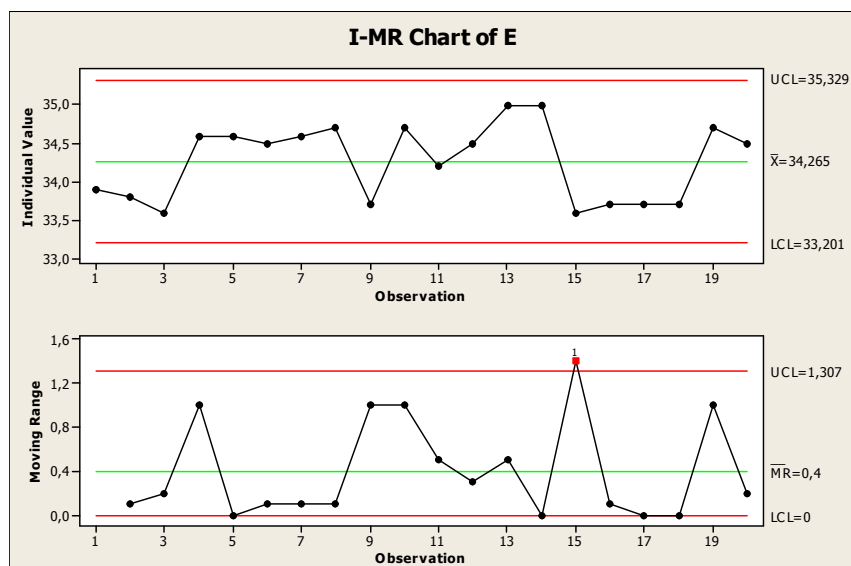
$$MR_1 = |x_2 - x_1|, \quad MR_2 = |x_3 - x_2|, \dots \quad (4.11)$$

Kontrolne granice za kretanje MR vrijednosti računaju se prema izrazu:

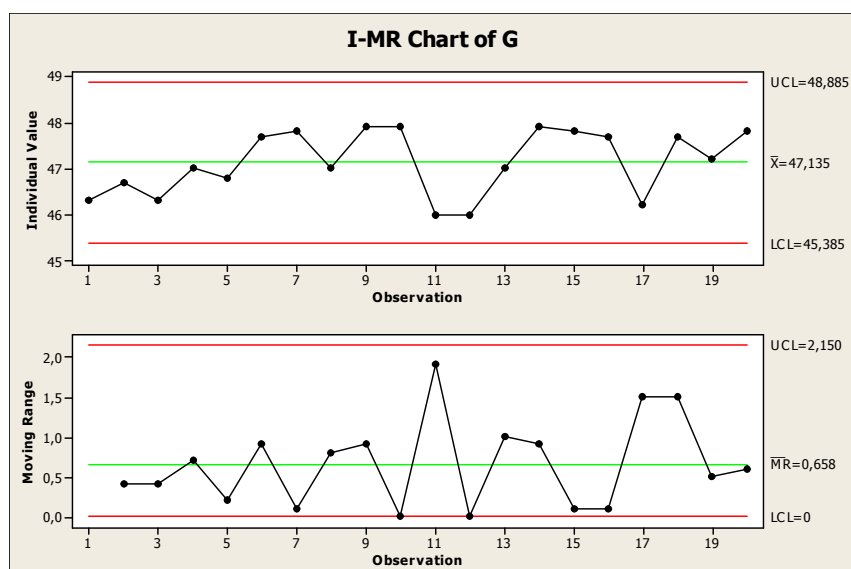
$$GKG_{MR} = 3,27\overline{MR} \quad (4.12)$$

$$DKG_{MR} = 0 \quad (4.13)$$

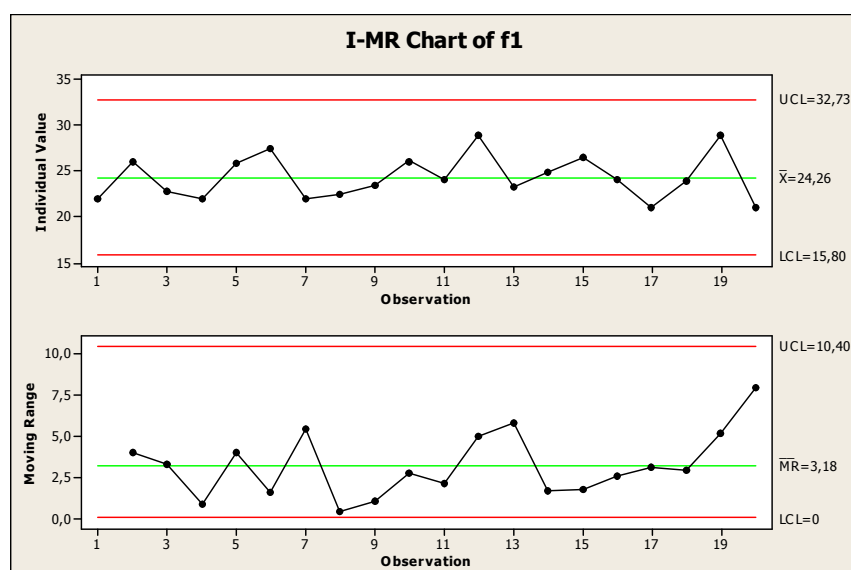
U nastavku su prikazane X – MR karte svih izmjerenih i izračunatih podataka iz uzoraka, kako bi se ustanovilo jesu li karakteristike prigušivača „pod kontrolom“. Ovdje treba naglasiti da su uzorci prikupljeni u četiri prolaza, dakle nisu iz iste serije, što će se pokazati bitnim kod nekih dobivenih rezultata.



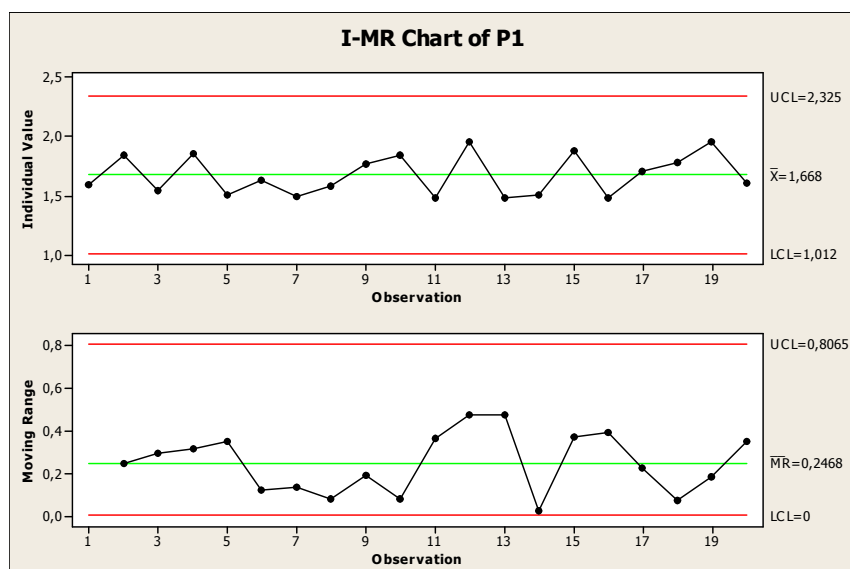
Slika 19. I-MR (eng. Individual - Moving Range) karta za dimenziju E



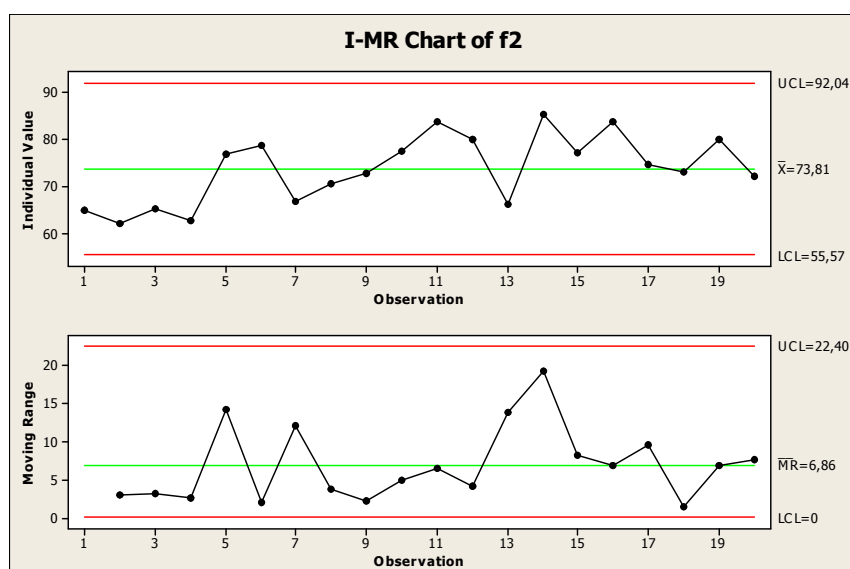
Slika 20. I-MR karta za dimenziju G

Slika 21. I-MR karta za prvu rezonantnu frekvenciju ( $f_1$ )

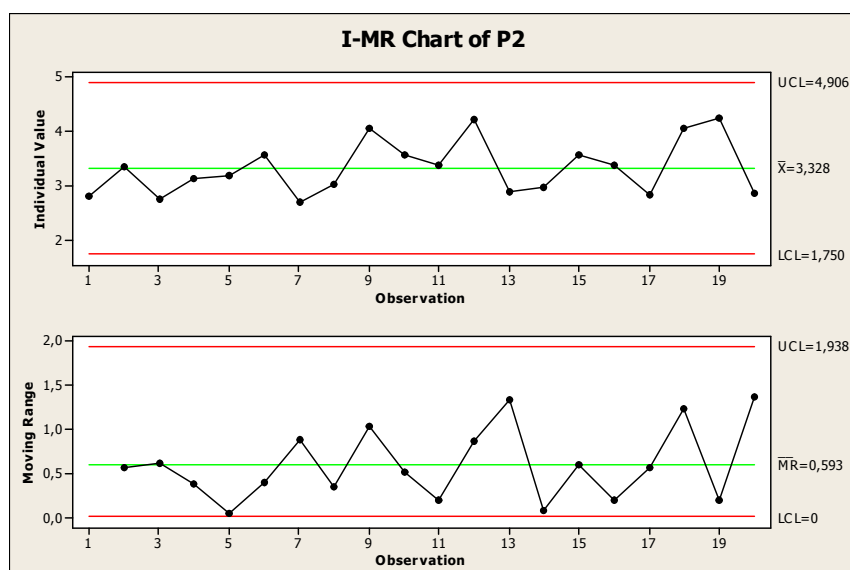




Slika 22. I-MR karta za minimalnu disipiranu snagu na prvoj rez. frekvenciji ( $P_1$ )



Slika 23. I-MR karta za drugu rezonantnu frekvenciju ( $f_2$ )



Slika 24. I-MR karta za minimalnu disipiranu snagu na drugoj rez. frekvenciji ( $P_2$ )

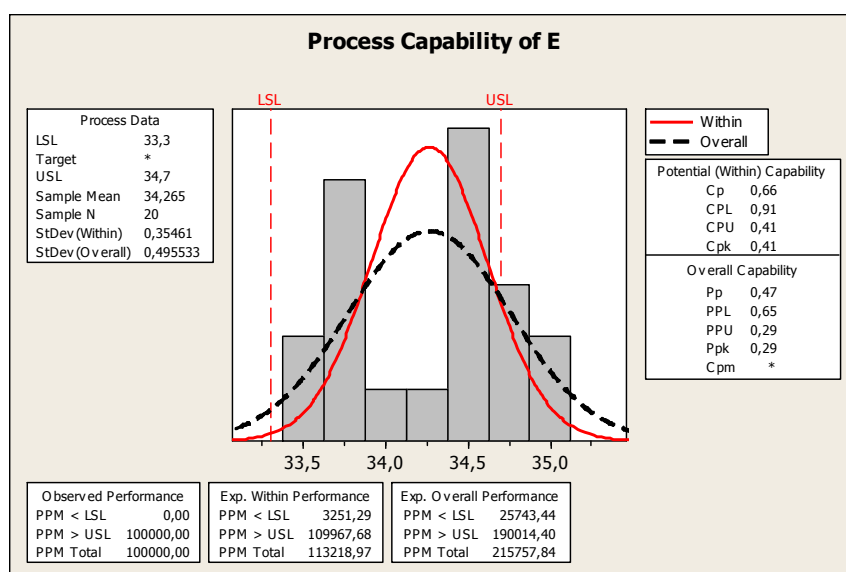
Praćenjem kontrolne karte za dimenziju  $E$  (slika 19) utvrđeno je da su rezultati individualnih mjerenja unutar kontrolnih granica (33,201 – 35,329) mm, tj. da nema značajnih varijacija rezultata. S druge strane, vrijednost pokretnog raspona uzorka broj 15 nalazi se izvan gornje kontrolne granice, dok su ostale vrijednosti pokretnog raspona unutar kontrolnih granica. Iz kontrolne karte za dimenziju  $G$  (slika 20) vidljivo je da su rezultati individualnih mjerenja unutar granica (45,385 – 48,885) mm, kao i vrijednosti pokretnog raspona (0 – 2,150) mm.

Rezultati praćenja kontrolnih karata za prvu rezonantnu frekvenciju i minimalnu snagu disipiranu na toj frekvenciji prikazani su slikama 21 i 22. Iz kontrolne karte za prvu rezonantnu frekvenciju vidljivo je da su i rezultati individualnih mjerenja (15,80 – 32,73) Hz i vrijednosti pokretnog raspona unutar kontrolnih granica (0 – 10,40) Hz. Isto vrijedi i za minimalnu snagu disipiranu na prvoj rezonantnoj frekvenciji, čije su individualne vrijednosti mjerenja unutar granica (1,012 – 2,325) W, kao i vrijednosti pokretnog raspona (0 – 0,8065) W. Praćenjem kontrolne karte za drugu rezonantnu frekvenciju (slika 23) utvrđeno je da su rezultati individualnih mjerenja unutar granica (55,57 – 92,04) Hz, a isto tako i vrijednosti pokretnog raspona se nalaze unutar kontrolnih granica (0 – 22,40) Hz. Iz kontrolne karte za minimalnu snagu disipiranu na drugoj rezonantnoj frekvenciji (slika 24) vidljivo je da su rezultati individualnih mjerenja također unutar granica (1,750 – 4,906) W, kao i vrijednosti pokretnog raspona (0 – 1,938) W.

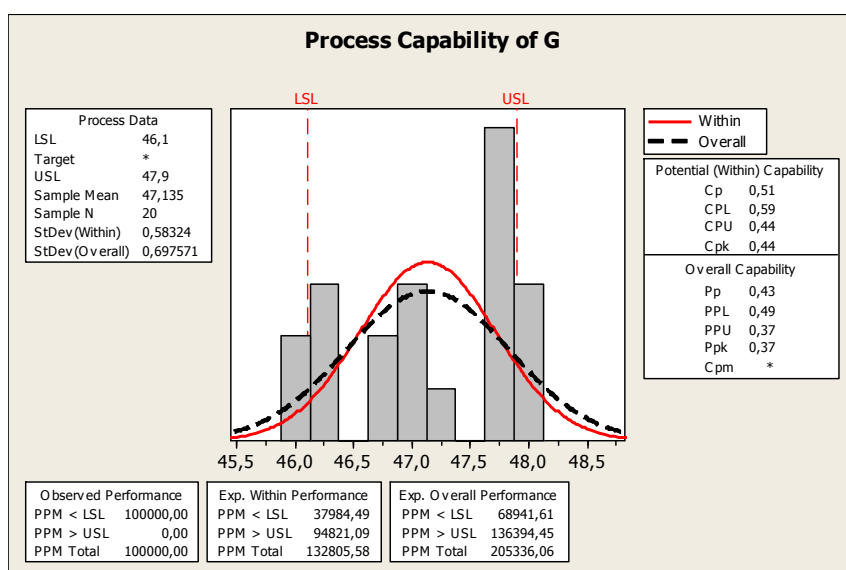
Praćenjem kontrolnih karata utvrđeno je da je zadovoljen nužan uvijet za procjenu sposobnosti procesa, a to je da se proces nalazi u stanju „pod kontrolom“. To znači da nema značajnih varijacija rezultata te da proces varira samo pod utjecajem slučajnih utjecaja. Kada je zadovoljen nužan uvijet, ide se na procjenu sposobnosti za svaku karakteristiku. Rezultati procjene sposobnosti su prikazani u nastavku.

#### 4.2.4. Procjena sposobnosti procesa

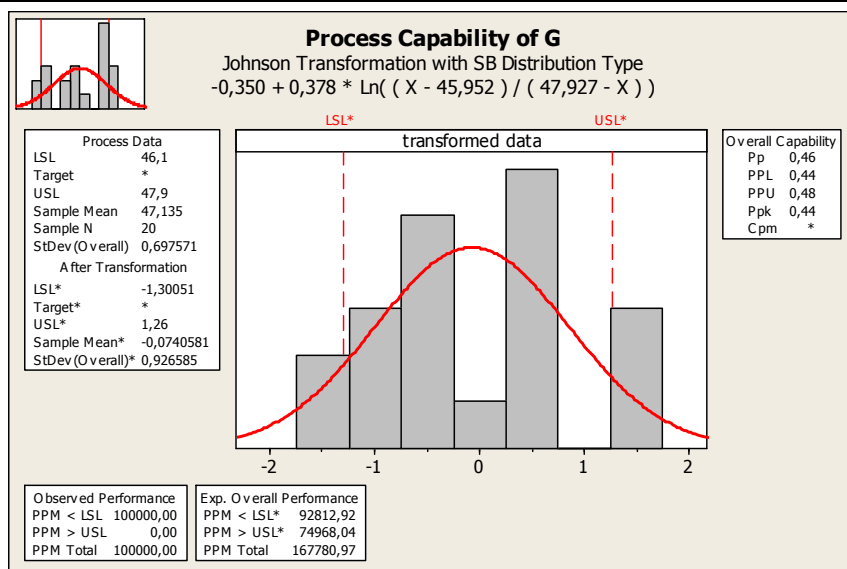
Sposobnost procesa se procjenjuje računanjem indeksa sposobnosti procesa. Proces je sposoban ako je raspon zahtjeva veći ili jednak od raspona procesa. Indekse sposobnosti procesa možemo izračunati nakon što smo iz kontrolnih karata utvrdili da je proces „pod kontrolom“. Kada proces ne bi bio „pod kontrolom“, računanje indeksa bi bila puka formalnost i zavaravanje. Sposobnost procesa se grafički prikazuje histogramom koji pokazuje ponaša li se proces po normalnoj razdiobi.



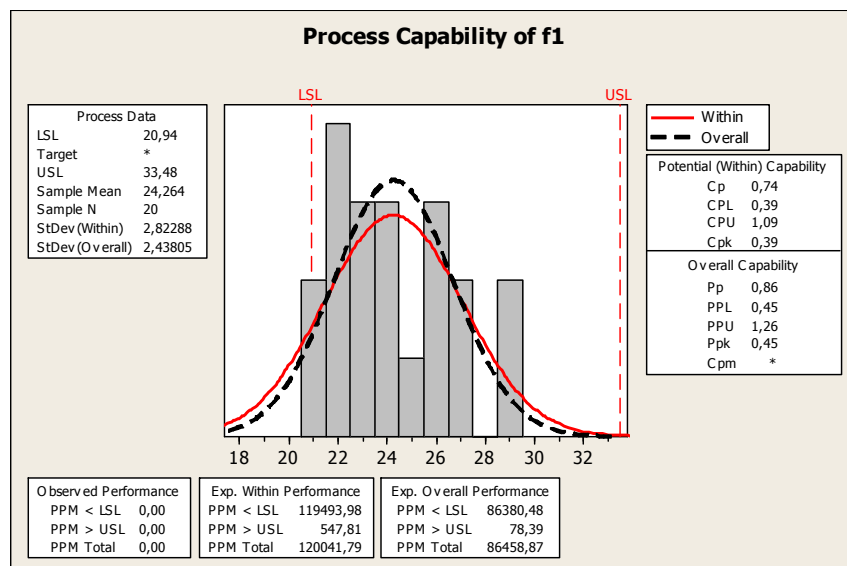
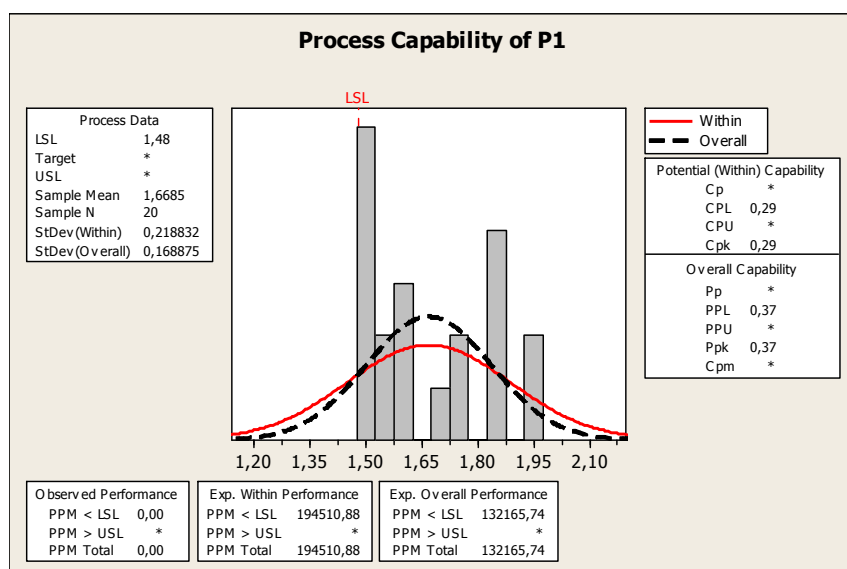
Slika 25. Procjena sposobnosti za dimenziju E

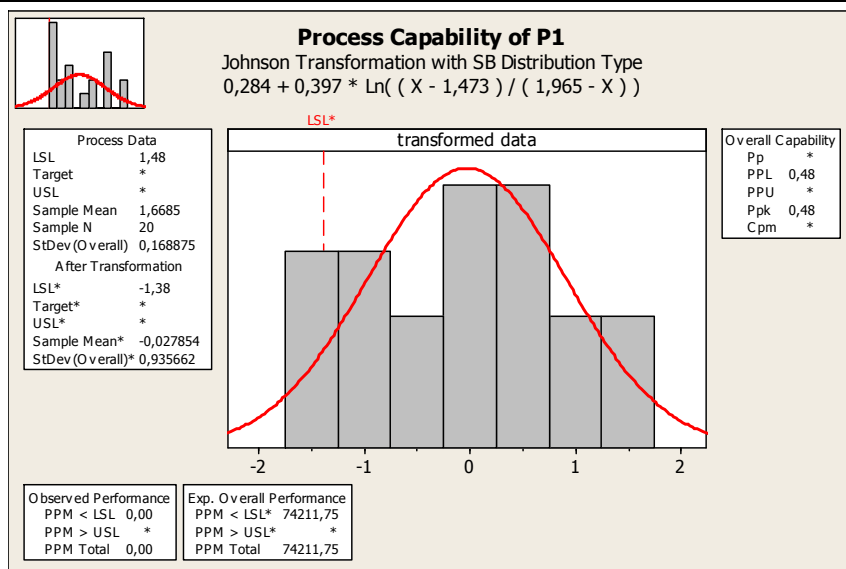


Slika 26. Procjena sposobnosti za dimenziju G

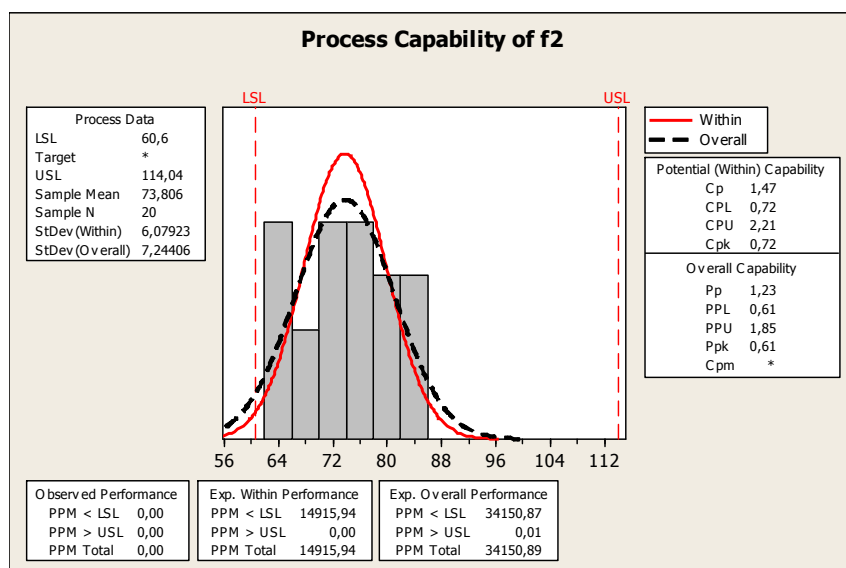


Slika 27. Procjena sposobnosti za dimenziju G nakon Johnson transformacije

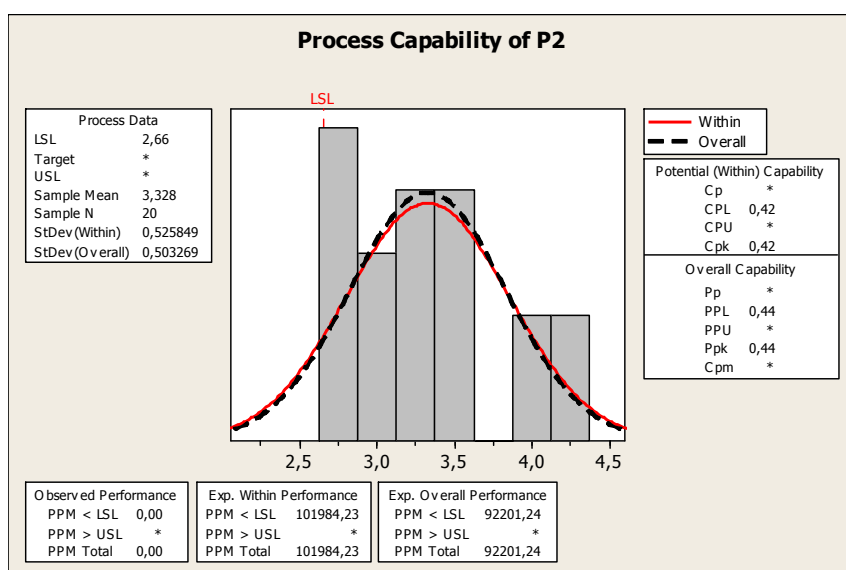
Slika 28. Procjena sposobnosti za prvu rezonantnu frekvenciju ( $f_1$ )Slika 29. Procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na prvoj rez. frekvenciji ( $P_1$ )



Slika 30. Procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na prvoj rez. frekvenciji ( $P_1$ ) nakon Johnson transformacije



Slika 31. Procjena sposobnosti za drugu rezonantnu frekvenciju ( $f_2$ )



Slika 32. Procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na drugoj rez. frekvenciji ( $P_2$ )

Analiza sposobnosti procesa pokazala je da procesi nisu sposobni, tj. da je rasipanje procesa šire od granica tolerancija, a uz to, rezultati se ne ponašaju po normalnoj razdiobi. Da bi proces bio sposoban, potencijalna i ukupna sposobnost procesa moraju biti veće ili jednake 1, zbog uvjeta da je proces sposoban ako je raspon zahtjeva veći ili jednak od raspona procesa. To nije bio slučaj niti kod jedne procjene sposobnosti, osim procjene sposobnosti za drugu rezonantnu frekvenciju  $f_2$ .

U slučaju procjene sposobnosti za dimenziju  $E$  (slika 25), potencijalna i ukupna sposobnost su manje od 1, dok oblik histograma, prema [8], upućuje na pomak procesa, tj. proces nije centriran, nego je pomaknut prema granicama. Prilikom procjene sposobnosti za dimenziju  $G$  (slika 26), vidljive su „rupe“ do kojih dolazi zato što uzorci nisu izuzimani odjednom, iz iste serije. Ovdje je korištena Johnson transformacija (slika 27) u cilju približavanja podataka normalnoj razdiobi. Ovime se neznatno povećala ukupna sposobnost procesa, no ona je i dalje manja od 1 pa je proces nesposoban. Kod procjene sposobnosti za prvu rezonantnu frekvenciju,  $f_1$  (slika 28), vidljivo je kako je raspodjela podataka „odsječena“ na granici zahtjeva, što upućuje na mogućnost da su podaci sortirani. U slučaju procjene sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na prvoj rezonantnoj frekvenciji (slika 30), ponovno je korištena Johnson transformacija, čime je dobivena nešto veća vrijednost demonstrirane izvrsnosti  $C_{pk}$ , no ona je i dalje manja od 1. Uz to se i ovdje može uočiti moguće sortiranje podataka. Demonstrirana izvrsnost procesa preuzima ulogu sposobnosti procesa u slučaju kada imamo samo jednu granicu zahtjeva.

Kod procjene sposobnosti za drugu rezonantnu frekvenciju  $f_2$  (slika 31) i potencijalna i ukupna sposobnost procesa su veće od 1 pa je taj proces sposoban. S druge strane, procjena sposobnosti za minimalnu snagu disipiranu na drugoj rezonantnoj frekvenciji (slika 32) pokazuje da proces nije sposoban, a uz to je vidljivo i da je raspodjela podataka „odsječena“ na granici zahtjeva, što ponovno upućuje na sortiranje podataka. Također, Johnson transformacija nije donijela nikakvo povećanje vrijednosti demonstrirane izvrsnosti pa nije niti prikazana.

Na početku analize se, zbog širokog raspona tolerancija, očekivalo da će proces biti sposoban, no analiza je pokazala da to nije slučaj. Iz svega navedenog, može se doći do zaključka kako je potrebno kontrolirati proces lijevanja utega na uže kako bi se dobile ujednačenije vrijednosti karakteristika prigušivača, pogotovo vrijednosti disipirane snage.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je detaljno opisan uzrok i mehanizam nastanka eolskih vibracija vodiča dalekovoda jer upravo ova pojava najčešće uzrokuje zamor materijala konstrukcijskih elemenata dalekovoda. Eolske vibracije nastaju zbog nastrujavanja vjetra na vodiče dalekovoda. Uslijed viskoznosti fluida i nejednolike distribucije tlaka oko vodiča dalekovoda, dolazi do formiranja vrtloga na zavjetrinskoj strani vodiča. Otkidanjem nastalih vrtloga dolazi do vibracija vodiča, a amplitude tih vibracija su okomite na smjer strujanja vjetra.

Učinak ove pojave se nastoji umanjiti korištenjem prigušivača vibracija. Danas su najčešće u upotrebi asimetrični Stockbridge prigušivači vibracija zbog jednostavne konstrukcije i dobrih karakteristika. U radu su detaljno opisani konstrukcijski dijelovi prigušivača, kao i postupak izrade Stockbridge prigušivača na način kako se izrađuju u tvrtki Dalekovod Proizvodnja. Najveća je pažnja posvećena postupku lijevanja utega na glasničko uže jer se upravo ovaj postupak pokazao ključnim za pojavu neujednačenih karakteristika prigušivača, dobivenih kasnijim ispitivanjima.

Ispitivanja karakteristika prigušivača su provedena u Dalekovodovom laboratoriju. Cilj ispitivanja je bio pronaći ovisnost između duljina krakova glasničkog užeta, kao parametra koji uzrokuje najveću pojavu varijabilnosti i snage koju prigušivač disipira. U tu svrhu, bilo je potrebno odrediti da li se proizvodnim procesom mogu proizvoditi jedinice unutar granica specifikacije, tj. procijeniti sposobnost procesa. Najprije je, pomoću MR kontrolne karte, utvrđeno da je proces „pod kontrolom“, čime je ispunjen temeljni uvjet za procjenu sposobnosti. Analizom sposobnosti utvrđeno je da proces nije sposoban jer je rasipanje procesa šire od granica tolerancije. Uz to, rezultati se ne ponašaju prema normalnoj razdiobi te u nekim slučajevima postoji mogućnost da su podaci sortirani. Iz dobivenih rezultata ispitivanja može se zaključiti da je potrebno kontrolirati proces lijevanja utega na glasničko uže. Preciznijim postupkom lijevanja, dobile bi se ujednačenije vrijednosti karakteristika prigušivača te ne bi postojala potreba za naknadnom obradom u svrhu postizanja zadovoljavajućih vrijednosti karakteristika prigušivača.

## LITERATURA

- [1] Zenzerović, I.: Završni rad, Zagreb, 2010.
- [2] Dahl, J. M.: Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder with Combined In-line and Cross-flow Motion, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [3] Schlichting, H.: Boundary-layer theory, McGraw-Hill, New York, 1979.
- [4] Stockbridge, G. H.: Vibration damper, U. S. Patent 1,675,391, 1928.
- [5] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [6] IEC 61897:1998, Overhead lines. Requirements and tests for Stockbridge type aeolian vibration dampers, 1999.
- [7] Mudronja, V.: Predavanja iz Kontrole kvalitete, Zagreb, 2009.
- [8] Mudronja, V.: Predavanja iz Upravljanja kvalitetom, Zagreb, 2013.